



TOGETHER
for a sustainable future

OCCASION

This publication has been made available to the public on the occasion of the 50th anniversary of the United Nations Industrial Development Organisation.



TOGETHER
for a sustainable future

DISCLAIMER

This document has been produced without formal United Nations editing. The designations employed and the presentation of the material in this document do not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of the Secretariat of the United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) concerning the legal status of any country, territory, city or area or of its authorities, or concerning the delimitation of its frontiers or boundaries, or its economic system or degree of development. Designations such as “developed”, “industrialized” and “developing” are intended for statistical convenience and do not necessarily express a judgment about the stage reached by a particular country or area in the development process. Mention of firm names or commercial products does not constitute an endorsement by UNIDO.

FAIR USE POLICY

Any part of this publication may be quoted and referenced for educational and research purposes without additional permission from UNIDO. However, those who make use of quoting and referencing this publication are requested to follow the Fair Use Policy of giving due credit to UNIDO.

CONTACT

Please contact publications@unido.org for further information concerning UNIDO publications.

For more information about UNIDO, please visit us at www.unido.org

20804-5

Distr. RESERVADA

ITPD/R.1
10 mayo 1994

ORGANIZACION DE LAS NACIONES UNIDAS
PARA EL DESARROLLO INDUSTRIAL

ESPAÑOL
Original: INGLES

MANUAL PRACTICO

LA INDUSTRIA SIDERURGICA

Resultados de un seminario sobre conservación de energía en la industria siderúrgica *

1992

Malasia

Indonesia

Patrocinado por la

Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI)

y el

Ministerio de Comercio Internacional e Industria (MITI) del Japón

Acogido por

Ministerio de Energía,
Telecomunicaciones y Correos de Malasia

Ministerio de Minas y Energía
de Indonesia

Organizado por el

Centro de Conservación de la Energía (CCE) del Japón

* El presente documento es traducción de un texto que no ha pasado por los servicios de edición.

PREFACIO

La conservación de energía es una medida esencial que todos podemos tomar para resolver los problemas, cada vez más importantes, de la crisis mundial de la energía y la degradación del medio ambiente. En particular, los países en desarrollo están interesados en que se tenga en ellos una mayor conciencia de la ineficiente generación y utilización de la energía. Sin embargo, por lo común sólo se dispone de fuentes de información limitadas sobre el empleo racional de la energía.

En consecuencia, los conocimientos especializados sobre las modernas tecnologías de ahorro y conservación de energía deberían difundirse entre los gobiernos y los administradores industriales, así como entre los ingenieros y los operarios a nivel de fábrica en los países en desarrollo. Es particularmente importante que todos ellos adquieran un conocimiento práctico de las tecnologías y técnicas de conservación de energía actualmente disponibles.

En diciembre de 1983, la ONUDI organizó una reunión regional sobre el consumo de energía, así como una reunión de un grupo de expertos sobre conservación de energía en las pequeñas y medianas industrias para los países asiáticos. Durante esas reuniones se señaló que en algunas industrias de gran intensidad de energía podían obtenerse ahorros de hasta un 10% mediante el mejoramiento de los servicios internos de carácter básico, como la auditoría y la gestión de energía.

El empleo racional de la energía exige una amplia utilización de las tecnologías de conservación de energía en los diversos sectores industriales en los que aquélla se desperdicia. Uno de esos sectores industriales de gran intensidad de energía que deben considerarse para mejorar la eficiencia mediante la introducción de modernas tecnologías de conservación es la industria siderúrgica.

En la industria siderúrgica puede mejorarse considerablemente el rendimiento energético mediante el aprovechamiento del calor residual de los hornos, el ajuste de la relación aire-combustible en los quemadores de hornos y calderas, el empleo de aguas usadas y la eliminación y vinculación de procesos productivos.

La ONUDI está ejecutando actualmente, con el apoyo financiero del Gobierno japonés, un programa regional de promoción y aplicación de tecnologías de ahorro de energía en determinados países asiáticos en desarrollo. El programa está encaminado a adaptar esas tecnologías innovadoras de conservación de energía, desarrolladas en el Japón, a las condiciones de los países en desarrollo.

En dicho programa consideramos que la transferencia de esas tecnologías podría conseguirse mediante:

- i) La realización de estudios sobre la utilización de la energía y el rendimiento energético a nivel de fábrica;
- ii) La preparación de manuales prácticos sobre la gestión de energía y las tecnologías de conservación y ahorro de energía, basados en los resultados de dichos estudios;
- iii) La presentación y análisis de los manuales prácticos en seminarios dirigidos a funcionarios gubernamentales, representantes de las industrias, directores de fábricas e ingenieros;
- iv) La difusión de los manuales prácticos en otros países en desarrollo para su debida utilización y aplicación por el sector industrial.

La experiencia adquirida mediante este programa se aprovechará para otros programas o proyectos concernientes a otros sectores industriales y a otros países y regiones en desarrollo.

La ONUDI inició este programa con el proyecto US/RAS/90/075 - Utilización racional de los recursos energéticos en la industria del acero y en la industria textil de Malasia e Indonesia.

El presente manual práctico sobre la industria siderúrgica ha sido preparado por la ONUDI, con la cooperación de expertos del Centro de Conservación de la Energía (CCE) del Japón en tecnologías de ahorro de energía, en el marco del citado proyecto de la ONUDI. Se basa en las conclusiones de los estudios realizados, en las observaciones efectuadas a nivel de fábrica y en las recomendaciones y sugerencias formuladas por los seminarios sobre conservación de energía en las industrias siderúrgica y textil celebrados en virtud del mismo proyecto en Jakarta (Indonesia) y Kuala Lumpur (Malasia) en enero de 1992. El manual práctico no sólo interesará a los gobiernos y a los representantes de la industria, sino también a los ingenieros y operarios de fábricas de países en desarrollo, pues ha sido concebido especialmente para estos últimos como ayuda para mejorar el rendimiento energético en el proceso de producción.

Deseamos dar las gracias a las siguientes instituciones por su valiosa contribución, que ha hecho posible la preparación y publicación del presente manual:

Ministerio de Minas y Energía, Indonesia
Ministerio de Energía, Telecomunicaciones y Correos, Malasia
Ministerio de Comercio Internacional e Industria (MITI), Japón
Centro de Conservación de la Energía (CCE), Japón.

Junio de 1992

INDICE

	<i>Página</i>
1. Características del manual	1
2. El proceso de producción de la industria siderúrgica	1
3. La promoción de las tecnologías de conservación de la energía	2
3.1 El horno de arco	2
3.1.1 Correspondencia de la energía térmica a partir de la fundición del acero en el horno de arco	2
3.1.2 Capacidad, tamaño necesario y equipo eléctrico del horno de arco	2
3.1.3 El proceso de fusión en el horno de arco	3
i) La alimentación: material y procedimiento	3
ii) El funcionamiento del horno de arco	5
3.2 El horno de recalentamiento	12
3.2.1 Especificaciones	12
3.2.2 Características del consumo de energía	15
3.2.3 Tecnologías de conservación de la energía	16
3.2.4 El balance térmico	18
3.2.5 Racionalización de la combustión	22
i) Optimización de la razón de aire	22
ii) Control de la presión del horno	25
3.2.6 Racionalización de los procesos de calentamiento y refrigeración	25
i) Carga caliente	25
3.2.7 Prevención de la pérdida de calor por radiación y transmisión	26
i) Prevención de la pérdida de calor por radiación desde la superficie del horno	26
ii) Prevención de las pérdidas de calor por las aberturas	30
3.2.8 Recuperación del calor perdido	33
i) Precaentamiento del aire para la combustión mediante un recuperador	33
Conclusiones	36

1. Características del manual

Con miras a promover la conservación de la energía en la industria siderúrgica, en el presente manual se resumen diversas medidas que pueden adoptarse para conservar eficazmente la energía y se describe la manera de aplicarlas.

Se centra en los hornos de arco y en los hornos de recalentamiento, que consumen una cantidad especialmente grande de energía y a los que es necesario aplicar más medidas de conservación de ésta.

En el presente manual se describen métodos generales de conservación de la energía y también ejemplos prácticos y resultados que pueden servir de referencia para los ingenieros que se ocupan del funcionamiento de las instalaciones de laminación. Les ayudará a adoptar medidas de conservación de la energía que sean adecuadas en concreto para sus instalaciones.

Esperamos que el manual se utilice como guía para conseguir una mejor eficiencia energética y unas prácticas de gestión más eficaces en la industria siderúrgica.

2. El proceso de producción de la industria siderúrgica

El método siderúrgico basado en el horno de arco utiliza eficazmente un recurso de desecho, pues su materia prima es la chatarra. Asimismo, con este método se ahorra energía, ya que para producir una tonelada de acero bruto se necesita menos energía que con el método de alto horno-convertidor. En la Figura 1 se muestra el proceso de producción de acero basado en el horno de arco.

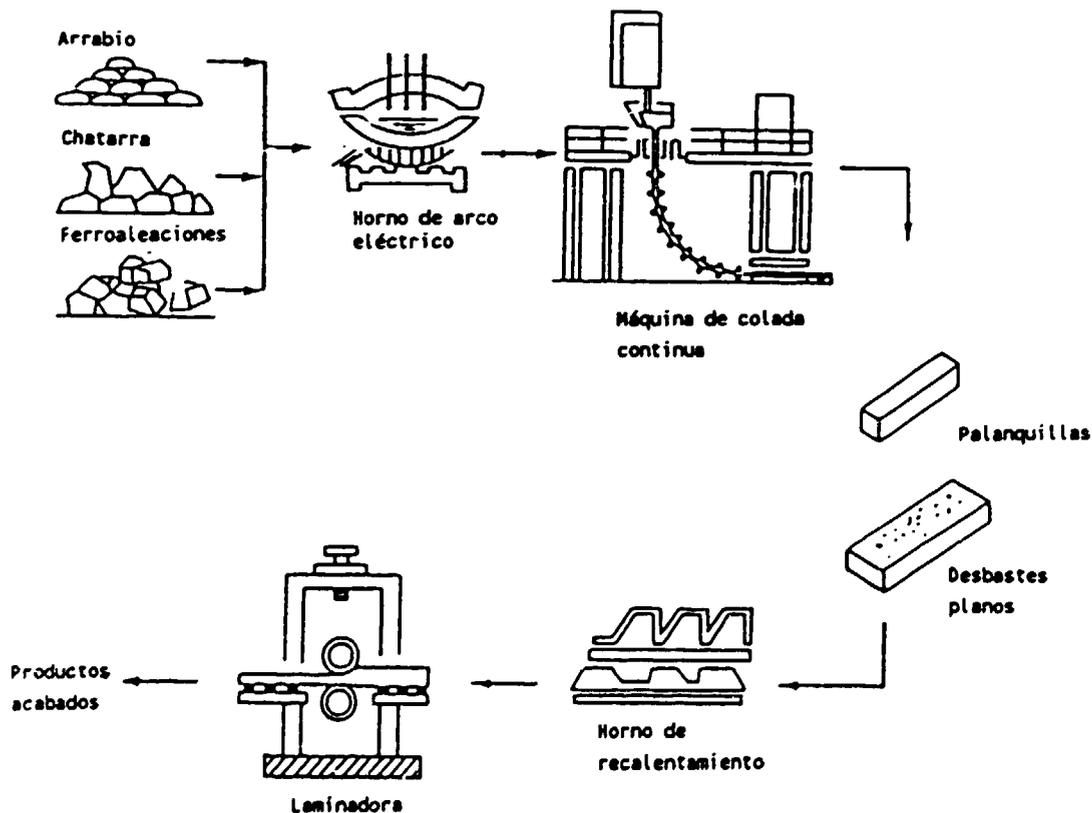


Figura 1 Proceso de producción de acero con el método de horno de arco

3. La promoción de las tecnologías de conservación de la energía

3.1 El horno de arco

3.1.1 Correspondencia de la energía térmica a partir de la fundición del acero en el horno de arco

La energía eléctrica es la principal fuente de energía que se utiliza en los hornos de arco.

En la industria siderúrgica, el horno de arco se emplea sobre todo para fundir el material de acero calentándolo por medio del arco y de la resistencia eléctrica y para eliminar de él componentes no deseables, como el fósforo, el azufre, el hidrógeno y el oxígeno mediante diversas reacciones químicas, como la descarburación, la desfosforación, la desulfuración y la desoxidación, a fin de dotarlo de las características físicas y mecánicas requeridas al mismo tiempo que se ajustan los contenidos de los principales componentes, como el carbono, de manera que se obtenga un acero con las propiedades adecuadas.

Para conseguir estos objetivos, es esencial que el proceso se realice con la mayor rapidez posible, pues las reacciones que se han mencionado pueden invertirse si el material permanece durante mucho tiempo en estado de fusión dentro del horno de arco.

Entre los principales métodos que se utilizan actualmente para acelerar el proceso de fusión y para ahorrar la energía eléctrica que necesita ese proceso figuran el empleo de un quemador de fueloil para ayudar a la fusión del material en el horno, el empleo de una lanza para detener la aportación de oxígeno, el soplado de oxígeno en el baño metálico y, en algunos casos, el empleo de un peso grande para comprimir en el horno el voluminoso material que lo alimenta.

Medidas de ahorro de energía basadas en el funcionamiento de los hornos de arco

Para ahorrar energía se debe:

- 1) Reducir el tiempo de funcionamiento.
- 2) Aumentar el tiempo de soldado por resistencia para evitar un consumo de energía innecesario. En consecuencia, debe evitarse en la mayor medida posible la utilización de materiales excesivamente voluminosos, que deben prensarse y convertirse en un bloque compacto.
- 3) Utilizar el soplado de oxígeno de forma eficaz para elevar rápidamente la temperatura por encima de los 1.600 °C. Es conveniente utilizar medios auxiliares, como un picafuegos.
- 4) Como el horno se carga dos o tres veces, y para garantizar la rapidez del proceso, es necesaria una buena coordinación entre el operario que maneja la grúa y los operarios del horno, de manera que no haya tiempos de espera a la entrada de éste.
- 5) Instalar transformadores de gran potencia y realizar una disolución rápida.

3.1.2 Capacidad, tamaño necesario y equipo eléctrico del horno de arco

En el Cuadro 1 se indican las relaciones entre la capacidad, el tamaño necesario y el equipo eléctrico.

Como puede verse en el Cuadro 2, la tasa de fusión depende en gran medida de la capacidad del transformador.

Cuadro 1 Relaciones entre capacidad del horno, tamaño necesario y equipo eléctrico

Capacidad teórica del horno [10 ³ kg]	Diámetro exterior del crisol [m]	Profundidad del baño de metal [mm]	Diámetro del electrodo [mm]	Capacidad del transformador [MV·A]			Tensión inducida (horno PO) [V]
				PO	PA	PUA	
2	2,178	300	175	1,5	-	-	180/80
5	2,743	400	200 - 250	3	5	-	200/100
10	3,353	400	300 - 350	5	7,5	-	220/100
20	3,962	450	350 - 400	7,5	12	15	240/100
30	4,572	650	400 - 450	12	18	22	270/120
50	5,182	750	450 - 500	18	25	30	330/130
60	5,486	850	500	20	27	35	400/130
70	5,791	850	500	22	30	40	400/130
80	6,096	900	500	25	35	45	430/140
100	6,400	950	500 - 550	27	40	50	460/160
120	6,706	1.000	550 - 600	30	45	60	500/200
150	7,010	1.000	600	30	50	70	500/200
170	7,315	1.050	600	35	60	80	500/200
200	7,620	1.100	600	40	70	100	560/200
400	9,754	1.200	700	-	-	150	

Fuente: Cast Product Handbook, 4ª ed., Japan Cast Product Association.

Notas: PO = potencia ordinaria, PA = potencia alta, PUA = potencia ultraalta.

Cuadro 2 Tasa de producción teórica a diferentes niveles de energía (horno de 70 t)

	Tiempo de fusión [min.]	Tasa de producción teórica [t/m]	Razón de eficiencia [%]
PO	159	100	100
PA	105	150	150
PUA	70	230	230

Fuente: Cast Product Handbook, 4ª ed., Japan Cast Product Association.

3.1.3 El proceso de fusión en el horno de arco

i) La alimentación: material y procedimiento

a) El material de alimentación

El tipo de material con que se alimenta el horno de arco para el proceso de fusión depende del producto que se vaya a obtener. Para producir lingotes y perfiles se utilizan por lo general virutas de

máquinas, chatarra de acero prensada, chatarra de acero ligero y chatarra de acero moldeado, mientras que para producir piezas de acero moldeado se emplean chatarra de acero moldeado, chatarra de acero ligero y virutas de máquinas.

En el primer caso, los materiales de alimentación son voluminosos y no pueden introducirse en el horno de una sola vez, sino que generalmente hay que hacerlo en dos o tres etapas. En cualquier caso, es esencial evitar que el material de alimentación contenga metales no ferrosos, como el cobre y el aluminio, y sustancias no metálicas, como la herrumbre y el aceite.

b) El procedimiento de alimentación

Como se ha señalado *supra*, para la obtención de productos de acero de tipo general se utilizan materiales voluminosos. Lo normal es abrir la bóveda del horno y utilizar una cesta de carga para introducirlos en varias etapas.

En la figura 2-a, 2-b y 2-c se muestra una secuencia típica de las operaciones de carga, en la que en tres etapas se introduce en el horno una carga de 10 toneladas.

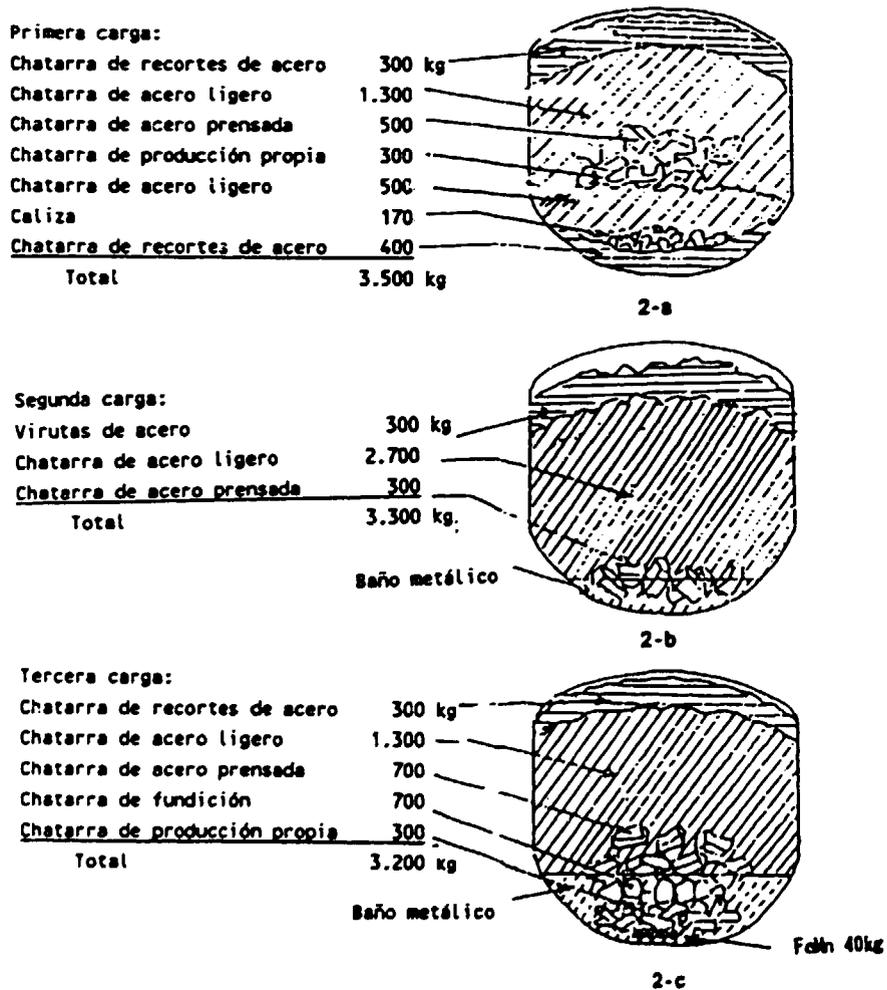


Figura 2 Método y secuencia de alimentación de un horno de arco (en tres etapas)

En la primera etapa se coloca en la base del horno una capa de virutas y después se introducen, por este orden, chatarra de acero ligero, chatarra de producción propia, chatarra de acero prensada, chatarra de acero ligero y virutas. En la segunda etapa se introducen en el fondo del baño metálico chatarra de acero prensada, chatarra de acero ligero y virutas. En la tercera se introducen mediante una cesta de carga, por este orden desde el fondo del baño hasta la parte superior del horno, chatarra de producción propia, chatarra de acero moldeado, chatarra de acero prensada, chatarra de acero ligero y virutas.

En cada operación de carga los materiales voluminosos deben situarse en la parte inferior del horno, y en la superior lo más ligeros. De esta manera se logra una utilización eficiente de la energía eléctrica y se evita que se dañen los electrodos.

Puede hacerse una derivación entre el recogedor de polvo y el horno de arco, colocándose una cesta de carga para precalentarla con el gas de combustión. Con ello se logra reducir el consumo de energía en 20-50 kWh/t.

ii) El funcionamiento del horno de arco

Una vez cargados los materiales en el horno de arco, se aplica la energía eléctrica y se realizan las operaciones de fusión tal como se describen en el siguiente ejemplo, basado en un horno que tiene una capacidad de 8 t (carga de 10 t).

a) El período de fusión

El período de fusión propiamente dicho absorbe más del 50% del consumo total de energía que se produce en todo el proceso de fusión en un horno de arco. Por consiguiente, para las operaciones se precisa contar con trabajadores calificados.

a. El mezclado del material de alimentación

Se recomiendan la composición del material y la secuencia de carga que fiuran a continuación.

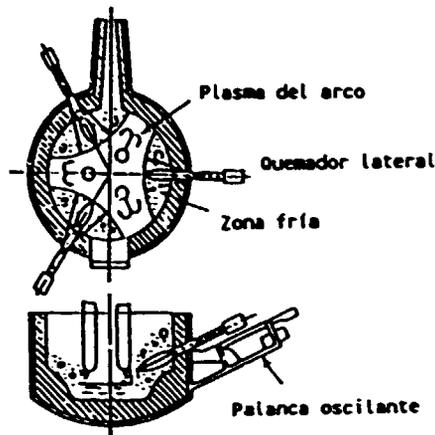
Composición recomendada

Chatarra de acero ligero	aprox. 60 %
Chatarra de recortes de acero	15 %
Chatarra de acero prensada	15 %
Chatarra de acero laminado prensada	5 %
Chatarra de producción propia	5 %

Cuando el material se carga en tres etapas, se recomienda que la proporción en peso sea de 45%, 30% y 25%.

b. El quemador de fueloil

A fin de ahorrar energía eléctrica, se emplea un quemador de fueloil para acelerar la fusión del material cargado en el horno. En este caso, el quemador se coloca en una zona fría del horno, como indica la Figura 3, de manera que no se quemen los electrodos.



Fuente: Cast Product Handbook, 4ª ed., Japan Cast Product Association.

Figura 3 Quemador lateral basculante, de fueloil

c. Especificaciones y uso de la lanza de oxígeno

Se recomiendan las especificaciones siguientes: un diámetro de 20-40 mm, una presión de 5-10 kgf/cm², un caudal de 20-60 m³/min y un consumo de 5-15 m³/t.

El corte con oxígeno debe realizarse a lo largo de la pared lateral del horno de tal manera que no resulte dañada la pared (Figura 4).

El corte con oxígeno, cuando es necesario, debe realizarse lo antes posible. Así, debe iniciarse unos 15 minutos después de la primera carga, unos 5 minutos después de la segunda y unos 5 minutos después de la tercera (tiempo medido a partir del momento en que se aplica la energía eléctrica).

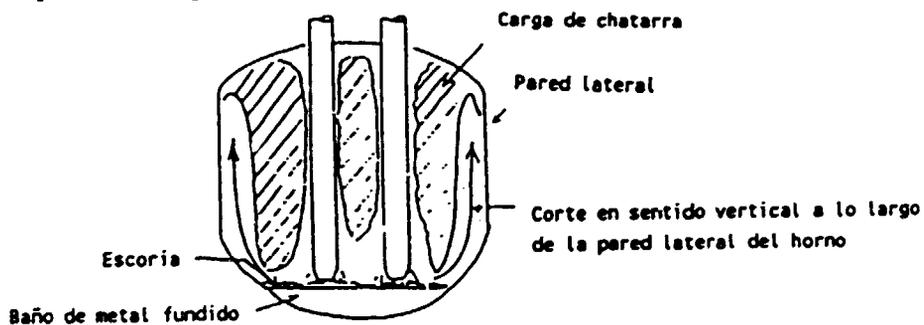
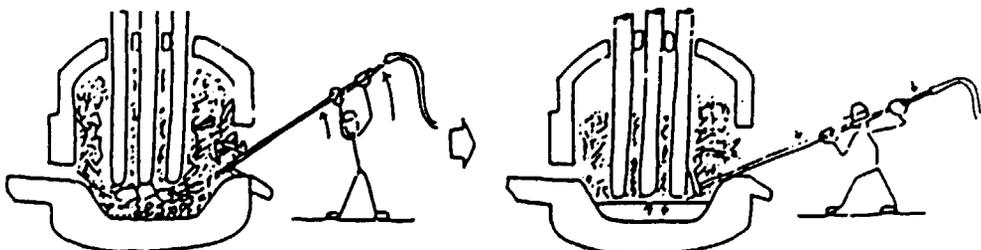


Figura 4 Corte con lanza de oxígeno

Durante el calentamiento, la lanza de oxígeno debe introducirse bastante (50 mm o más, según la capacidad del horno) en el baño metálico para evitar que resulten dañados los electrodos, como muestra la Figura 5-a, 5-b y 5-c.



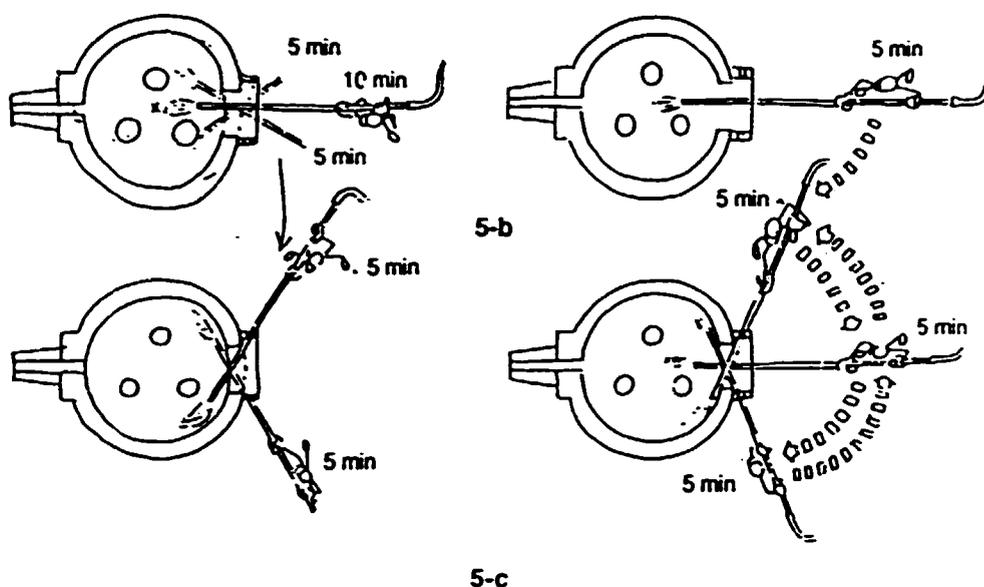


Figura 5 Proceso de soplado del oxígeno en el período de oxidación

d. Compresión del material de alimentación con un peso

Cuando el material voluminoso adquiere en el horno un color ligeramente rojo, se retira la bóveda y se comprime el material con un peso adecuado suspendido de una grúa, interrumpiéndose la corriente eléctrica para ahorrar energía. Una vez terminada la compresión, se conecta inmediatamente la corriente eléctrica.

La compresión del material con el peso debe realizarse de 15 a 25 minutos después del momento en que se aplica la corriente eléctrica, en función del peso total del material. La operación debe realizarse rápidamente, y por tanto en estrecha coordinación con la grúa.

e. Eliminación de la escoria tras la fusión

La chatarra de acero que se introduce en el horno suele contener muchos componentes no deseables, como arena, piedras, ladrillos rotos y residuos de hormigón, que dejan gran cantidad de escoria tras la fusión y reducen la fluidez. La escoria debe eliminarse lo antes posible.

b) El período de oxidación

Se toman muestras del baño de metal fundido y se analiza en ellas el contenido de carbono, silicio, manganeso y azufre para poder ajustar la composición nada más iniciarse el período de oxidación.

El período de oxidación desempeña una función básica en la aceleración de importantes procesos, como la desfosforación, la desulfuración, la descarburación y la desoxidación. Para ello se requiere que el baño metálico tenga una temperatura de 1.600 °C como mínimo. Para conseguirla, se disminuye el voltaje a fin de intensificar la corriente. Es en este período en el que se realiza el soplado de oxígeno mediante una lanza. Para detalles de esta operación, véase la descripción que se ofrece en el apartado a) c, "Especificaciones y uso de la lanza de oxígeno". Al final del período de oxidación, la temperatura del baño metálico debe ser por lo general superior a 1.620 °C.

Una vez finalizado el período de oxidación debe retirarse por completo la escoria que aflora a la superficie del baño de metal fundido.

c) El período de reducción

Durante el período de reducción se efectúa la limpieza en presencia de la escoria básica para eliminar el oxígeno del baño, que ha aumentado en el período de oxidación. Al mismo tiempo se realiza la desulfurización y se ajusta la composición y temperatura del baño.

El proceso de desoxidación es una técnica de difusión con la que se logra reducir la escoria y forzar la desoxidación. El acero se extrae cuando la escoria en reducción se ha hecho estable una vez que el aumento de la temperatura del baño revela que ha terminado la limpieza. Estas operaciones se ilustran en la Figura 6 (a-b-c-d-e-f-g-h).

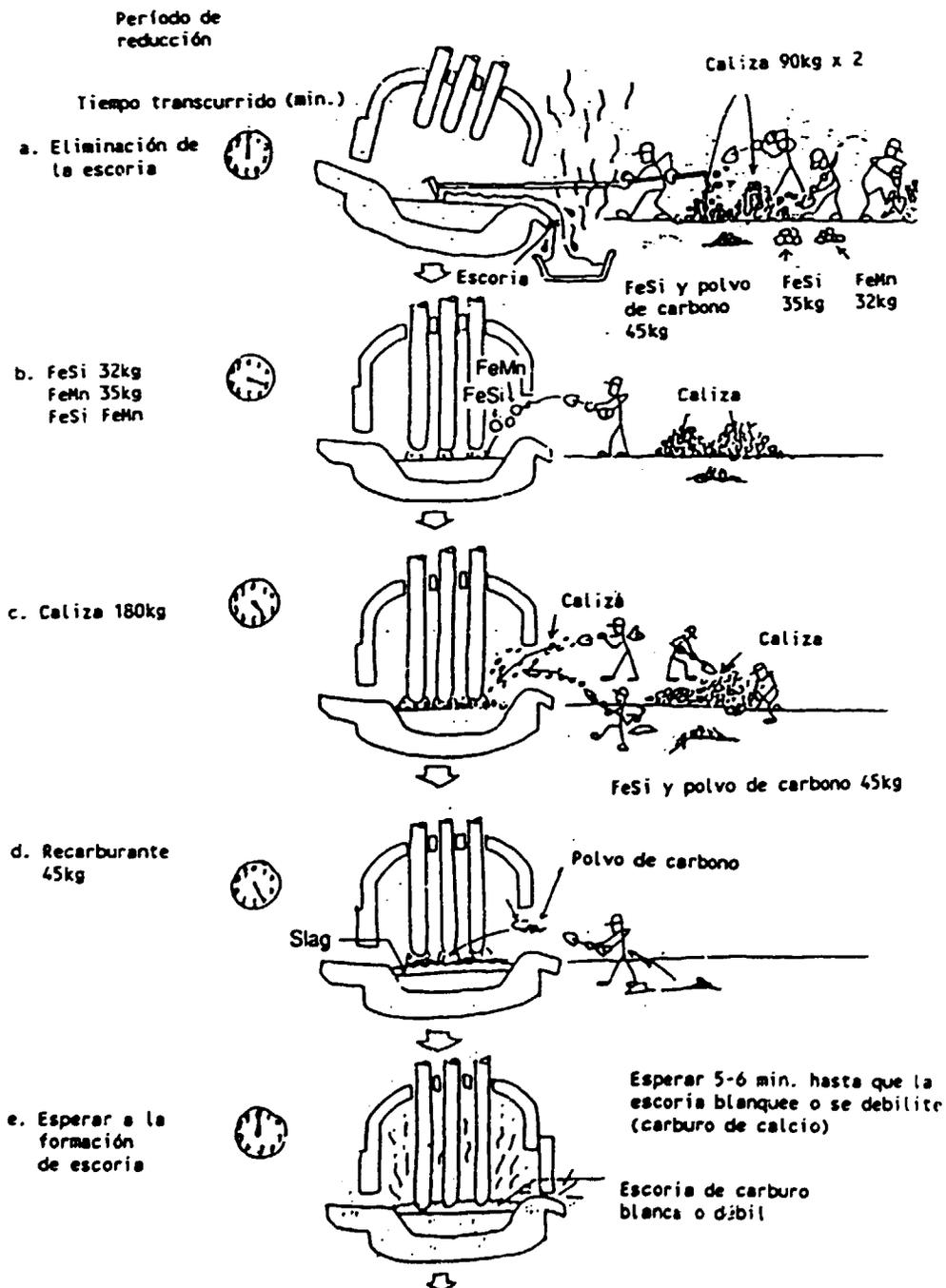


Figura 6 El período de reducción en un horno de arco básico (I)

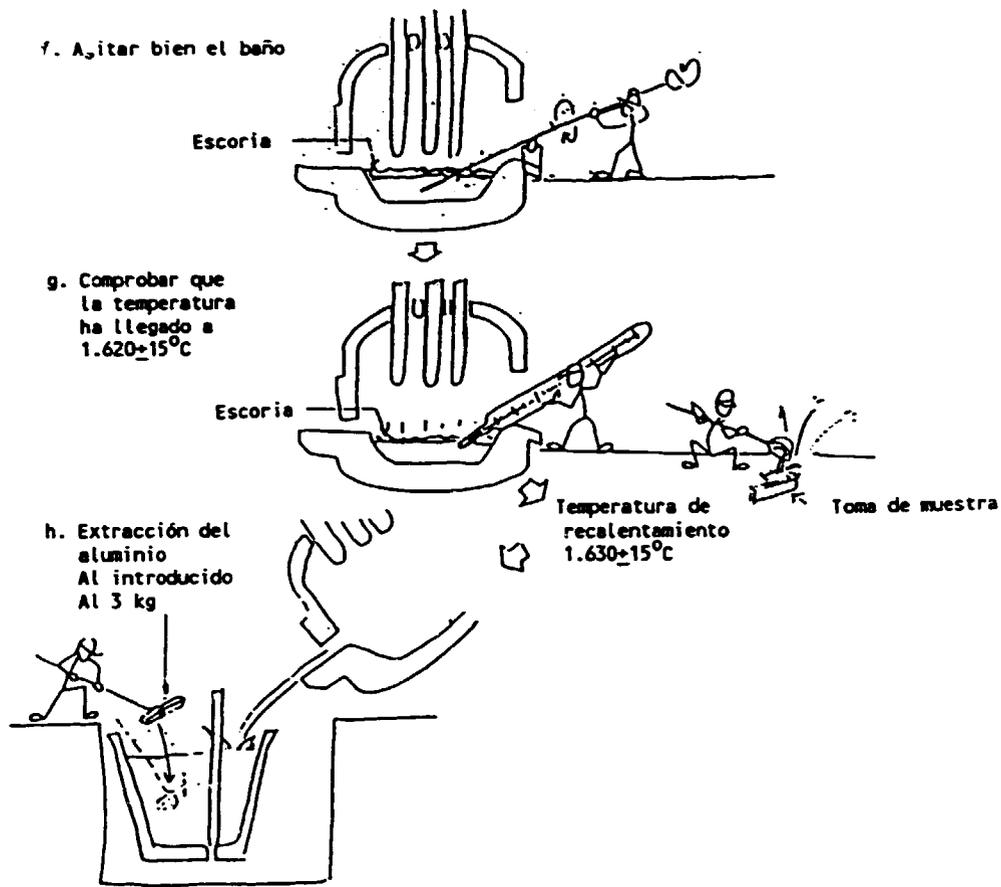


Figura 6 El período de reducción en un horno de arco básico (2)

d) Precauciones en el funcionamiento del horno de arco

Como se ha señalado al principio, el proceso de fabricación de acero mediante fusión en un horno de arco tiene como finalidad principal eliminar los elementos no deseables, como el fósforo, el azufre, el hidrógeno y el oxígeno, y ajustar la composición de los diversos componentes, entre ellos el carbono. Estas reacciones son muy sensibles cuando se realizan en presencia de escoria a alta temperatura. Es por tanto de la máxima importancia evitar la difusión del calor fuera del horno y la entrada de aire en el horno. Es asimismo esencial impedir que el horno llegue a un estado no apropiado para la formación de escoria. Además, las operaciones deben realizarse con rapidez, pues su duración puede afectar a la calidad del producto.

e) Operaciones tras la extracción del acero y reducción de la duración

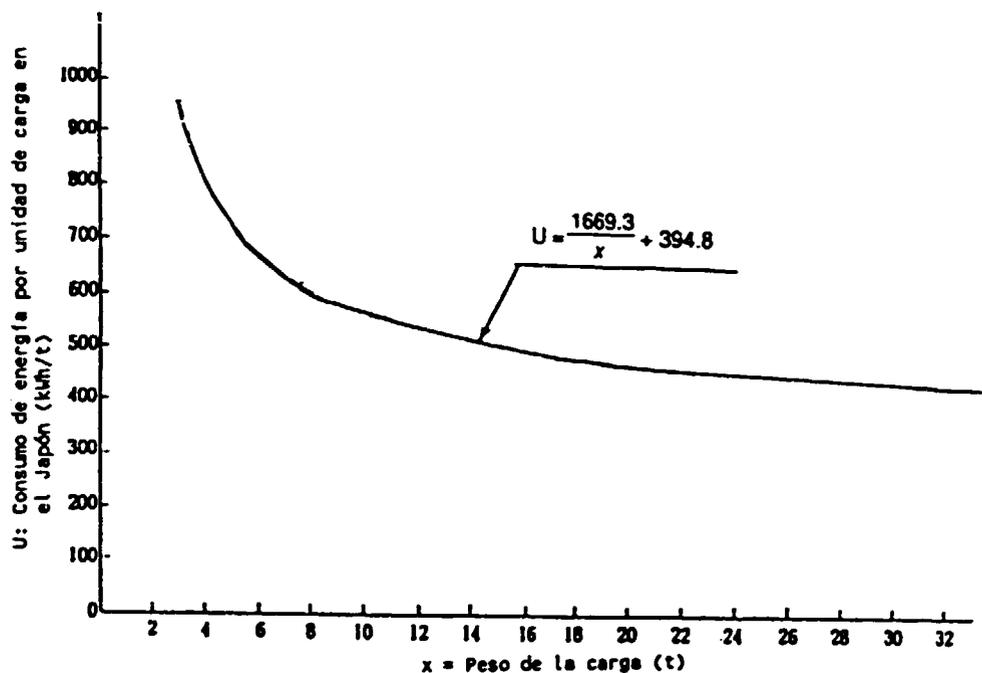
Reducir el tiempo que transcurre entre la extracción del acero y el comienzo del siguiente proceso de fusión es importante para mejorar la eficiencia de la extracción del acero y disminuir el consumo de energía.

Los materiales de reparación del horno, la caliza, los materiales de alimentación, etc. deben estar siempre a mano para poder realizar con rapidez las operaciones de reparación y carga del horno. También han de efectuarse rápida y sistemáticamente las operaciones coordinadas con la grúa, etc. Para conseguirlo es esencial que los operarios posean la capacitación adecuada.

f) Consumo unitario de energía del horno de arco básico y método habitual de fusión

En la sección anterior se ha descrito el proceso de fusión en el horno de arco. A continuación se ilustra el método de fusión que se utiliza habitualmente en los hornos de arco básicos en el Japón, así como el consumo de energía típico por unidad de producción en ese país.

El Cuadro 3 y la Figura 7 muestran respectivamente el funcionamiento del proceso y el consumo de energía típico por unidad de carga.



Fuente: 1977 Japan Cast and Forged Steel Association Report of Analysis on Unit Steel Production in Different Electric Arc Furnaces.

Figura 7 Consumo normal de energía por unidad de carga en el Japón (kWh/t)

Cuadro 3 Proceso normal de la fabricación de acero en un horno básico

Carga de materiales y aditivos	Proceso	Tiempo necesario [min.]	Operaciones	Composición química [%]				Temperatura de fusión del acero [°C]
				C	Si	Mn	P, S	
Dolomita -> Magnesia	Mantenimiento	10 - 20	Alimentación de corriente eléctrica					Aumento de la temperatura
Acero en chatarra -> CaCO ₃ 10 - 40 kg/t -> (CaO 5 - 20 kg/t) Recarburante (en caso necesario)	Carga	5 - 10						
	Periodo de fusión	40 - 60	Corte con oxígeno					
Mineral de hierro (escama de óxido) ->			Fusión completa	0,40/ 0,60		0,20/ 0,40	≤0,070	
CaCO ₃ -> CaF ₂	Periodo de oxidación	20 - 40	Afino por oxidación					
O ₂ ->			Presión del oxígeno 5 - 10 kgf/cm ² Tasa de descarburación 0,04 - 0,09 % C/min.					
	Desespumado	5 - 8	Desespumado completo	0,10/ 0,15		0,20/ 0,30	P ≤0,020	
Si-Mn, Fe-Mn, Fe-Si ->								
CaCO ₃ 20 - 30 kg/t } (CaO 10 - 15 kg/t) } CaF ₂ 4 - 6 kg/t } C-P } 1,5 - 2,5 kg/t } Si-P }	Periodo de reducción	20 - 50	Escoria blanca, escoria de carburo débil (basicidad 2,5 - 3,0)					
			Determinación del grado de desoxidación				S ≤0,020	
Ferroaleación -> Al 0,3 kg/t ->	Extracción del acero	3 - 5	Extracción del acero (precalentamiento de la cuchara de colada)	0,20/ 0,30	0,30/ 0,50	0,50/ 0,80		
							1.600 - 1.640	

Fuente: Cast Product Handbook, 4ª ed., Japan Cast Product Association.

3.2 El horno de recalentamiento

3.2.1 Especificaciones

Una vez que se han obtenido las palanquillas en una laminadora de desbastes o por colada continua, se calientan de nuevo en un horno de recalentamiento a una temperatura determinada en función de su destino ulterior, para pasar después al proceso de laminación en caliente que ofrece los productos acabados.

Los hornos de recalentamiento pueden dividirse en hornos por lotes y hornos continuos. Los primeros se utilizan sobre todo como equipo auxiliar para recalentar materiales que tienen una forma especial. Para la producción en serie se utilizan por lo general los hornos continuos.

En los hornos continuos cabe distinguir tres tipos: el horno de empuje, el horno de solera móvil y el horno de largueros móviles. Antes se utilizaban sobre todo los hornos de empuje, y para tratamientos especiales los de solera móvil. Al aumentar la capacidad de calentamiento se están adoptando de manera generalizada los hornos de largueros móviles. Las Figuras 8 y 9 muestran ejemplos de un horno de empuje y un horno de largueros móviles. En el Cuadro 4 se comparan los tres tipos de horno, y en el Cuadro 5 se presentan diversas disposiciones de los hornos de recalentamiento.

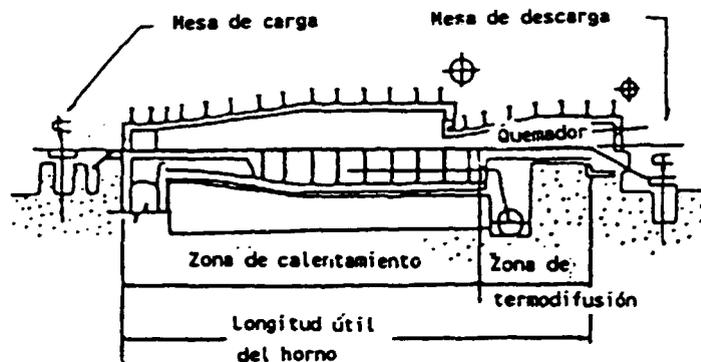


Figura 8 Horno de empuje de tres zonas

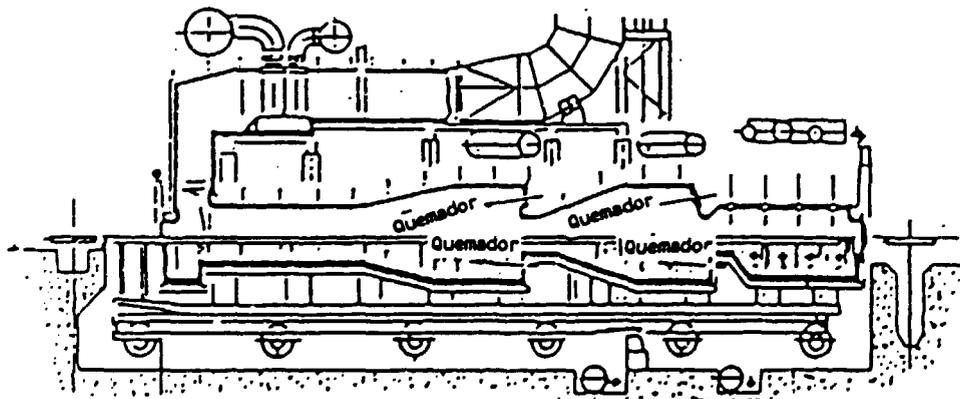
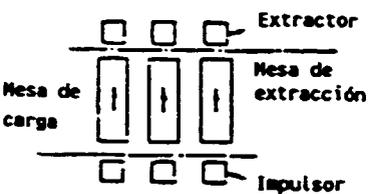
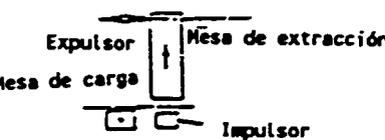


Figura 9 Horno de largueros móviles

Cuadro 4 Comparación de tipos de horno

Tipo de horno	Ventajas	Inconvenientes	Aplicaciones
Horno de empuje	1. El costo de instalación es algo más bajo que en los otros tipos.	Es fácil que se produzcan marcas de rodillo y arañazos.	Producción en serie.
	2. Permite el calentamiento por las dos caras.	Hay un límite para su longitud.	Muy utilizado en muchos laminadores. Se está sustituyendo por el horno de largueros móviles.
	3. Muy eficiente.	No puede modificarse rápidamente el espesor de los materiales de acero.	
Horno de solera móvil	1. No deja marcas de rodillo.	Al calentarse por un solo lado, es largo.	Se emplea para el calentamiento y el tratamiento térmico de materiales delgados, palanquillas redondas y tubos de acero.
	2. No produce arañazos.	La eliminación de la cascarilla en la solera es complicada.	
	3. El horno se vacía por sí solo.		
Horno de largueros móviles	1. No hay límite para su longitud.	El costo de instalación es algo mayor.	Producción en serie.
	2. Pocas marcas de rodillo, y sin arañazos.	Deja muchas marcas de rodillo, y la pérdida por el agua de refrigeración es bastante alta.	Se emplea para palanquillas de formas bastas que no puede tratarse en los hornos de empuje, especialmente desbastes gruesos, y cuando se requieran productos de excelente calidad.
	3. Muy eficiente.		
	4. El horno se vacía por sí solo.		

Cuadro 5 Disposición de un horno de recalentamiento

Método de carga y de extracción	Disposición del horno	Características
<p>Carga trasera, extracción delantera</p>	 <p>El diagrama muestra tres mesas de carga y extracción dispuestas horizontalmente. Encima de cada mesa hay un extractor, y debajo hay un impulsor. Las flechas indican el flujo de material desde la mesa de carga hacia la mesa de extracción.</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Es fácil cargar y extraer palanquillas de gran tamaño. 2. La instalación es sencilla cuando hay dos o más hornos. Así, este método es adecuado para plantas de gran capacidad, como los laminadores de bandas en caliente o los de desbastes planos. 3. Las aberturas de carga y extracción son amplias, por lo que es grande la pérdida de calor por radiación térmica o por entrada de aire. 4. La extracción se realiza empujando o mediante extractores.
<p>Carga trasera, extracción lateral</p>	 <p>El diagrama muestra una mesa de carga a la izquierda y una mesa de extracción a la derecha. Un expulsor está situado entre ellas, empujando el material desde la mesa de carga hacia la mesa de extracción. Un impulsor está debajo de la mesa de extracción.</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Las palanquillas pueden mantenerse calientes durante el laminado gracias a la proximidad del tren de laminado y el horno de recalentamiento. 2. Escasa pérdida de calor por radiación térmica en la salida de extracción. 3. La extracción se realiza mediante expulsos o rodillos. Pero cuando se usan los segundos la pérdida de calor es grande por el agua que los refrigera.
<p>Carga lateral, extracción lateral</p>	 <p>El diagrama muestra una mesa de carga y una mesa de extracción dispuestas lateralmente. Un expulsor está situado entre ellas, empujando el material desde la mesa de carga hacia la mesa de extracción. Un impulsor está debajo de la mesa de extracción.</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Escasa pérdida de calor tanto en la entrada de carga como en la salida de extracción. Es el método más adecuado para los hornos de recalentamiento de palanquillas largas.

La disposición de los quemadores en el horno es muy importante desde el punto de vista de las características del proceso de calentamiento. Según las posiciones que ocupen los quemadores, cabe hablar de tres métodos: quema de flujo axial, quema lateral y quema desde el techo. Cada uno de estos métodos tiene sus características propias, y se elige uno u otro en función de las ventajas que presente para un horno. En algunos hornos se aplica una combinación de los tres métodos. En el Cuadro 6 figura una comparación de los diversos métodos de quema.

Cuadro 6 Comparación de diversos métodos de quema en los hornos de recalentamiento

	Elemento	Quema de flujo axial	Quema lateral	Quema desde el techo
1	Posición de los quemadores con respecto al horno			
2	Combustible	Aceite pesado, gas C, gas M, etc.	Aceite pesado, gas C, gas M, etc.	Queroseno, gas C, gas M, etc.
3	Tipo de llama	Llama larga.	Llama corta (tipo variable).	Por radiación con fuerte carga.
4	Regulación de la cantidad de combustible	Amplias posibilidades de regulación.	Pocas posibilidades de regulación. Es necesario un ajuste fino, en función de la cantidad de quema.	Bastantes posibilidades de regulación.
5	Carga térmica	Puede ser grande con quemadores de gran capacidad.	Puede ser grande con quemadores de gran capacidad.	No muy grande con quemadores pequeños.
6	Limitación debida al tamaño del horno	Limitación de la longitud por la zona a lo largo del horno.	Limitación a lo ancho del horno.	No especialmente. Es imposible la infraquema.
7	Caudal de gas combustible dentro del horno	Uniforme a lo largo del horno.	Tendencia al desplazamiento, pues la dirección de los quemadores y la del horno a lo largo están en ángulo recto.	Uniforme en el horno, pues la mayor parte se realiza en los ladrillos.
8	Estructura de los quemadores en relación con el crisol	Se necesitan boquillas, y la estructura del crisol es complicada.	No hay boquillas, y la estructura es sencilla.	La estructura del horno es sencilla, pero complicada la disposición de las conducciones debido al gran número de quemadores.
9	Uniformidad del calentamiento (pauta de calor)	Se puede conseguir fácilmente a lo ancho del horno. La temperatura tiende a bajar en las boquillas a lo largo del horno.	Escasa a lo ancho del horno. Es fácil obtenerla a lo largo.	Se consigue fácilmente en las dos direcciones, a lo ancho y a lo largo.
10	Rendimiento	Relativamente bueno excepto en torno a los quemadores en la zona baja donde la temperatura es alta.	Bueno.	Bastante bajo con una temperatura relativamente alta y muchos quemadores.

3.2.2 Características del consumo de energía

En el decenio de 1960 la tasa de consumo de combustible era de 370×10^3 a 450×10^3 kcal/t en los hornos de empuje y de 450×10^3 a 590×10^3 kcal/t en los hornos de largueros móviles, en los que era importante la pérdida de agua de refrigeración en los largueros, refrigerados por agua. Hoy han caído en desuso los hornos de empuje y predominan los de largueros móviles, y en éstos la tasa de consumo de energía era en 1989 de entre 203×10^3 kcal/t y 566×10^3 kcal/t, con un promedio de

267 x 10³ kcal/t, gracias al efecto acumulado de las diversas medidas que se describen *infra*. También ha contribuido en gran medida a esta mejora la difusión de la carga en caliente, que utiliza la alta temperatura del proceso anterior.

3.2.3 Tecnologías de conservación de la energía

Las ideas fundamentales en materia de conservación de la energía en los hornos de recalentamiento son la racionalización de la combustión, la racionalización de los procesos de calentamiento y refrigeración, la evitación de las pérdidas de calor por radiación y transmisión y la recuperación del calor perdido. La Figura 10 muestra un diagrama característico de la conservación de la energía en el horno de recalentamiento, y en la Figura 11 se ilustran los elementos principales.

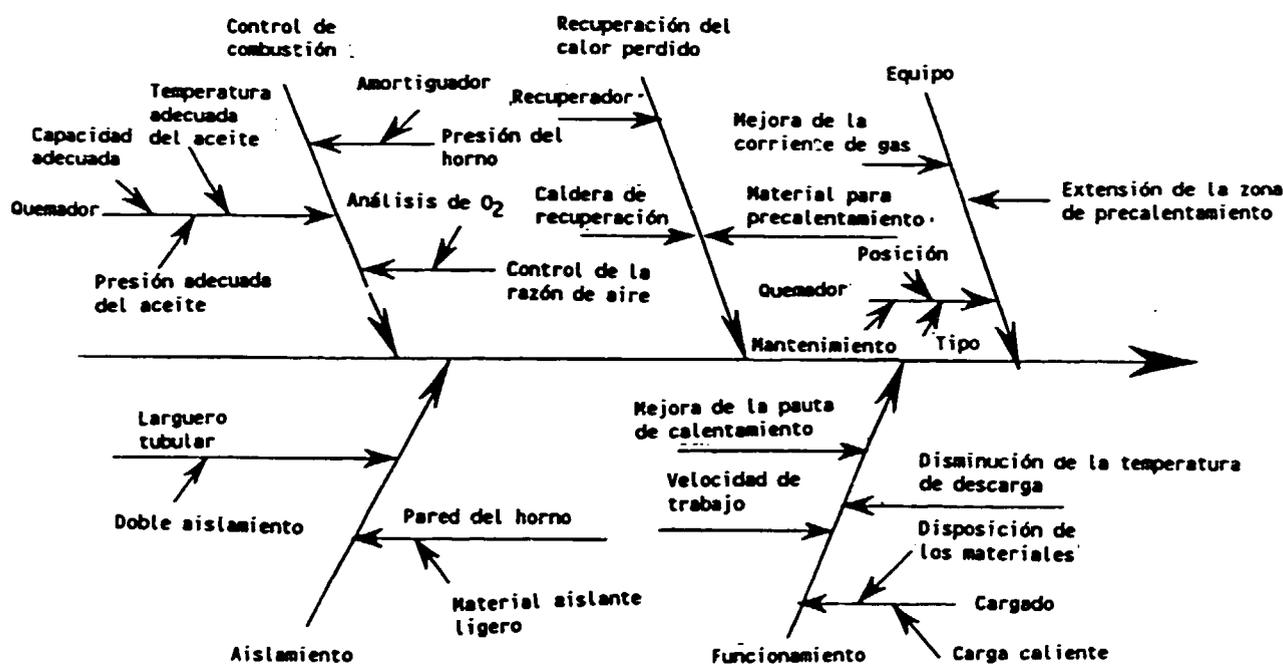


Figura 10 Diagrama de las características de conservación de la energía en un horno de recalentamiento

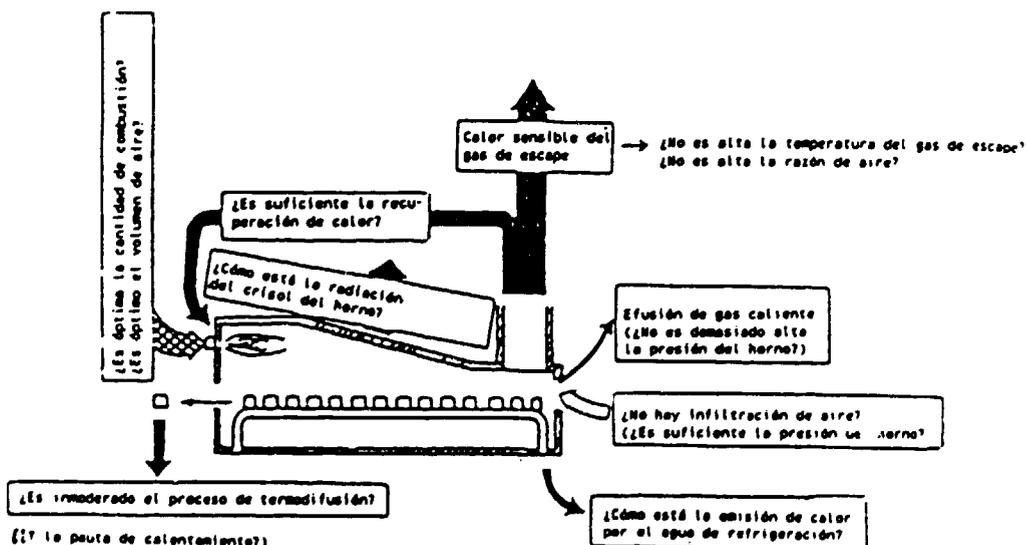


Figura 11 Punto de reducción respecto de la tasa de consumo de combustible

Cuadro 7 Elementos de medición y resultados

1	Fecha y duración de la medición (horas)				
2	Persona encargada de la medición				
3	Clima		Presión atmosférica	Temperatura atmosférica	Temp. ambiente
			mmHg	°C	°C
					Humedad relativa
					%
4	Combustible	Zona de termodifusión	Consumo	kg/t o m ³ N/t	
5		Zona superior de calentamiento	Consumo	kg/t o m ³ N/t	
6		Zona inferior de calentamiento	Consumo	kg/t o m ³ N/t	
7		Presión		kgf/cm ³ o mmAq	
8		Temperatura		°C	
9		Componentes		%	
10		Valor calorífico mínimo		kcal/kg o kcal/m ³ N	
11	Atomizador	Tipo			
12		Zona de termodifusión	Consumo	kg/t o m ³ N/t	
13		Zona superior de calentamiento	Consumo	kg/t o m ³ N/t	
14		Zona inferior de calentamiento	Consumo	kg/t o m ³ N/t	
15		Presión		kgf/cm ³ o mmAq	
16	Temperatura		°C		
17	Aire secundario	Zona de termodifusión	Consumo	kg/t o m ³ N/t	
18		Zona superior de calentamiento	Consumo	kg/t o m ³ N/t	
19		Zona inferior de calentamiento	Consumo	kg/t o m ³ N/t	
20		Presión		mmAq	
21		Temperatura antes del precalentamiento		°C	
22	Temperatura después del precalentamiento		°C		
23	Agua de refrigeración	Consumo		t/t	
24		Temperatura a la entrada		°C	
25		Temperatura a la salida		°C	
26	Presión		kgf/cm ³		
27	Gas de combustión	Temperatura en el extremo del horno		°C	
28		Temperatura de entrada del precalentador		°C	
29		Temperatura de salida del precalentador		°C	
30	Componentes		%	CO ₂ , O ₂ , CO, (CH ₄ , H ₂)	
31	Cenizas	Cantidad de combustible		%	
32		Cantidad de cenizas		kg/kg	
33	Aire calentado	Tamaño (espesor x anchura x longitud)		mm x mm x mm	
34		Peso unitario		kg	
35		Carga total		t	
36		Temperatura de carga		°C	
37		Temperatura de descarga		°C	
38		Pérdida de combustión		kg/t	
39	Tiempo medio de permanencia en el horno		h		
40	Presión del horno		mmAq		
41	Temp. en la superficie de cada parte del crisol		°C		

Observación: En lo que se refiere al método de medición del elemento 41, describirlo en el esquema del horno.

3.2.4 El balance térmico

El balance térmico es un medio eficaz de promover la conservación de la energía. Refleja numéricamente la situación de la pérdida de calor y del rendimiento térmico en un momento dado. Así, sobre la base de esos datos, se puede saber cómo mejorar las normas de funcionamiento y las instalaciones. De esta manera, la realización del balance térmico es un requisito previo a la hora de promover la conservación de la energía. Con miras a la correcta comprensión de los conceptos de pérdida de calor y eficiencia en el horno de recalentamiento se ha publicado la Norma Industrial Japonesa (JIS) G0702, "Method of heat balance for continuous furnaces for steel". En el Cuadro 7 se indican los elementos de medición y los resultados de medición, y el Cuadro 8 presenta un balance térmico.

Cuadro 8 Balance térmico

Entrada de calor			Salida de calor		
Elemento	10 ³ kcal/t	%	Elemento	10 ³ kcal/t	%
Calor de combustión			Cantidad de calor en el acero extraído		
Calor sensible del combustible			Calor sensible de la cascarilla		
Calor sensible del aire			Calor sensible del gas de escape		
Calor aportado por el atomizador			Calor perdido por combustión incompleta		
Cantidad de calor en el acero cargado			Cantidad de calor extraída por el agua de refrigeración		
Calor de la formación de cascarilla			Cantidad de calor extraída por el agua de refrigeración		
			Otras pérdidas de calor		
Total			Total		
Calor recuperado por el precalentador	()	()	Calor recuperado por el precalentador	()	()

Observaciones:

1. Para registrar la cantidad de calor, utilizar 10³ kcal/t como unidad y redondear los decimales a la cifra más próxima.
2. En el porcentaje, redondear los decimales a la cifra más próxima.

A continuación figura un ejemplo concreto de balance térmico de un horno de recalentamiento de acero continuo.

1) Criterio de medición en el balance térmico

El balance térmico se mide respecto de una tonelada de carga de acero tomando como referencia la temperatura del aire exterior y el valor calorífico mínimo del combustible durante la operación.

2) Resultados de las mediciones

a) Acero

Cantidad cargada (t/h)	Temperatura de carga (°C)	Temperatura de descarga (°C)	Pérdida por combustión (kg/t)
99,6	25	1.270	14,2

b) Combustible

Combustible	Consumo (kg/h)	Componente del aceite pesado					Contenido de agua	Valor calorífico máximo (kcal/kg)	Temperatura (°C)
		C %	H %	O %	N %	S %			
Aceite pesado al carbono	4.572	84,7	11,7	0,8	0,4	2,2	0,2	10.280	64

c) Gas de escape de la combustión

Temperatura	Composición del gas de escape pobre			
	CO ₂	O ₂	CO	N ₂
520 °C	12,7 %	1,8 %	0,0 %	85,5 %

d) Agua de refrigeración

Cantidad de agua (kg/t)	Temperatura de entrada (°C)	Temperatura de salida (°C)
5.200	34	45

- e) Temperatura del aire para la combustión 55 °C
- f) Temperatura del aire exterior 25 °C

3) Cálculo de cantidades de entrada y salida

a) Cantidad de entrada

Acero cargado	Aceite pesado al carbono	Cantidad de aire para la combustión
1 tonelada	4.572/99,6 = 45,9 kg/t	(A ₀)

$$A_0 = \frac{1}{100} \left[8,89 \times C + 26,7 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 3,33 \times S \right]$$

$$A_0 = \frac{1}{100} \left[8,89 \times 84,7 + 26,7 \left(11,7 - \frac{0,8}{8} \right) + 3,33 \times 2,2 \right] = 10,7 \text{ m}^3 \text{ N/kg de combustible}$$

$$m (\text{razón de aire}) = \frac{21}{21 - 79 \left[\frac{(O_2) - 0,5 (CO)}{(N_2)} \right]} = \frac{21}{21 - 79 \left[\frac{1,8}{85,5} \right]} = 1,09$$

Cantidad de aire por kg de combustible (A) A = m A₀ = 1,09 x 10,7 m³ N/kg de combustible

Por consiguiente, la cantidad de aire necesaria para la combustión de una tonelada de acero es

$$1,09 \times 10,7 \times 45,9 = 535 \text{ m}^3 \text{ N/t}$$

b) Cantidad de salida

a. Cantidad de acero extraído : Siendo 14,2 kg la pérdida por combustión que experimenta una tonelada de acero $1 - 0,0142 = 0,9858 \text{ t}$

b. Cantidad de cascarilla : Cuando no se analizan los componentes de la cascarilla, se supone que el contenido de Fe es el 75% del peso. Por tanto,

$$\text{Cantidad de cascarilla} = \frac{\text{pérdida por combustión}}{\text{contenido de Fe en la cascarilla}} = \frac{14,2}{0,775} = 18,8 \text{ kg/t}$$

c. Cantidad de gas de escape pobre procedente de la combustión (G')

$$G' = G_0 + (m - 1) A_0 \quad [G_0 : \text{cantidad teórica de gas de escape pobre}]$$

$$G_0 = \frac{1}{100} \left[8,89 \times C + 21,1 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 3,33 \times S + 0,8 \times N \right]$$

$$G_0 = \frac{1}{100} \left[8,89 \times 84,7 + 21,1 \left(11,7 - \frac{0,8}{8} \right) + 3,33 \times 2,2 + 0,8 \times 0,4 \right] = 10,1 \text{ m}^3 \text{ N/kg de combustible}$$

$$G' = 10,1 + (1,09 - 1) \times 10,7 = 11,1 \text{ m}^3 \text{ N/kg de combustible}$$

Por consiguiente, la cantidad de gas de escape pobre para una tonelada de acero es

$$11,1 \times 45,9 = 509,5 \text{ m}^3 \text{ N/t}$$

d. Cantidad de vapor de agua en el gas de escape procedente de la combustión (Se puede ignorar la humedad contenida en el aire para la combustión).

$$\frac{1}{100} (9H + \text{contenido de agua}) = \frac{1}{100} (9 \times 11,7 + 0,2) = 1,06 \text{ kg / kg de combustible}$$

$$\text{Para una tonelada de acero} = 1,06 \times 45,9 = 48,7 \text{ kg/t}$$

4) Cálculo de la entrada y la salida de calor

a) Entrada de calor

a. Valor calorífico mínimo del combustible (H_L) [H_H = valor calorífico máximo]

$$H_L = H_H - 600 (9H + \text{contenido de agua})$$

$$H_L = 10.280 - 600 (9 \times 0,117 + 0,002) = 9.650 \text{ kcal/kg de combustible}$$

$$\text{Para una tonelada de acero} = 9.650 \times 45,9 = 442.940 \text{ kcal/t}$$

- b. Calor sensible del combustible : Suponiendo que el calor específico medio del aceite pesado al carbono es $0,45 \text{ kcal/kg} \cdot ^\circ\text{C}$, $\Rightarrow 45,9 \times 0,45 \times (64 - 25) = 810 \text{ kcal/t}$
- c. Calor sensible del aire : Suponiendo que el calor específico medio del aire es $0,31 \text{ kcal/m}^3 \text{ N} \cdot ^\circ\text{C}$, $\Rightarrow (535 \times 0,31) \times (55 - 25) = 4.980 \text{ kcal/t}$
- d. Cantidad de calor contenida en el acero cargado : Como el acero se carga a la temperatura del aire exterior, la cantidad de calor que contiene es cero.
- e. Calor procedente de la formación de cascarilla : Cuando no se analizan los componentes de la cascarilla, se supone que el calor procedente de la formación de ésta es $1.335 \text{ kcal/kg} \cdot \text{Fe}$ por cada kg de Fe contenido en ella. Por consiguiente, $1.335 \times 14,2 = 18.960 \text{ kcal/t}$

b) Salida de calor

- a. Cantidad de calor contenida en el acero extraído : $[1.000 \text{ (kg)} - \text{pérdida por combustión de Fe (kg)}] \times [\text{cantidad de calor contenida en el acero a la temperatura de descarga (kcal/kg)} - \text{cantidad de calor contenida en el acero a la temperatura del aire exterior (kcal/kg)}]$
 $= (1.000 - 14,2) \times [200,4 - (-2,9)] = 200.410 \text{ kcal/t}$
- b. Calor sensible de la cascarilla : Tomando $0,215 \text{ kcal/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ como calor específico medio de la cascarilla, se supone que la temperatura de ésta cuando sale del horno es la misma que la temperatura de descarga del acero. $\Rightarrow 18,8 \times 0,215 \times (1.270 - 25) = 5.030 \text{ kcal/t}$
- c. Calor sensible del gas de escape pobre procedente de la combustión : Tomando $0,33 \text{ kcal/m}^3 \text{ N} \cdot ^\circ\text{C}$ como calor específico medio del gas de escape pobre procedente de la combustión, $\Rightarrow 509,5 \times 0,33 \times (520 - 25) = 83.230 \text{ kcal/t}$
- d. Calor contenido en el vapor de agua del gas de escape : Tomando $0,45 \text{ kcal/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ como calor específico medio del vapor de agua, $\Rightarrow 48,7 \times 0,45 \times (520 - 25) = 10.850 \text{ kcal/t}$
- e. Calor extraído por el agua de refrigeración : Tomando $1 \text{ kcal/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ como calor específico medio del agua, $\Rightarrow 5.200 \times 1 \times (45 - 34) = 57.200 \text{ kcal/t}$
- f. Otras pérdidas de calor : La diferencia entre la entrada total de calor y la salida total de calor.
 $(442.940 + 810 + 4.980 + 18.960) - (200.410 + 5.030 + 83.230 + 10.850 + 57.200) = 110.970 \text{ kcal}$

En el Cuadro 9 figura el balance térmico que resume los resultados obtenidos supra.

Como se puede observar en este balance térmico, el 20,1% de la salida de calor corresponde al gas de escape, y el 12,2% al agua de refrigeración. Se cree que las "otras pérdidas de calor", equivalentes al 23,8%, corresponden en su mayor parte a la cantidad de radiación térmica que emana de la superficie del crisol del horno. Con ello se demuestra la necesidad de reducir esas pérdidas.

Cuadro 9 Balance térmico

Entrada de calor			Salida de calor		
Elemento	10 ³ kcal/t	%	Elemento	10 ³ kcal/t	%
Calor de combustión	442,9	94,7	Cantidad de calor en el acero extraído	200,4	42,8
Calor sensible del combustible	0,8	0,2	Calor sensible de la cascarilla	5,0	1,1
Calor sensible del aire	5,0	1,1	Calor sensible del gas de escape	94,1	20,1
Calor aportado por el atomizador	0	0	Calor perdido por combustión incompleta	0	0
Cantidad de calor en el acero cargado	0	0	Cantidad de calor extraída por el agua de refrigeración	0	0
Calor de la formación de cascarilla	19,0	4,0	Cantidad de calor extraída por el agua de refrigeración	57,2	12,2
			Otras pérdidas de calor	111,0	23,8
Total	467,7	100,0	Total	467,7	100,0
Calor recuperado por el precalentador	(0)	(0)	Calor recuperado por el precalentador	(0)	(0)

Observaciones:

1. Para registrar la cantidad de calor, utilizar 10³ kcal/t como unidad y redondear los decimales a la cifra más próxima.
2. En el porcentaje, redondear los decimales a la cifra más próxima.

3.2.5 Racionalización de la combustión

i) Optimización de la razón de aire

En los hornos de recalentamiento, la optimización de la razón de aire es la forma más práctica y económica de conservar la energía. El efecto de esta medida es mayor cuando la temperatura es alta. La razón de aire es el valor que se obtiene dividiendo la cantidad de aire consumida por la cantidad teórica de aire para la combustión, y representa el grado de exceso de aire. En el Japón, la razón de aire normal para un horno de recalentamiento de acero continuo se ha fijado en 1,25. Y este valor normal se estipula como la razón de aire medida a la salida del horno durante la combustión, en torno a la carga teórica y una vez realizadas las verificaciones y reparaciones.

Si la razón de aire es demasiado alta, la cantidad de gas de escape aumenta. Así, la pérdida debida al gas de escape aumenta proporcionalmente a la razón de aire, ya que la temperatura del gas es constante. Esta relación se ilustra en la Figura 12.

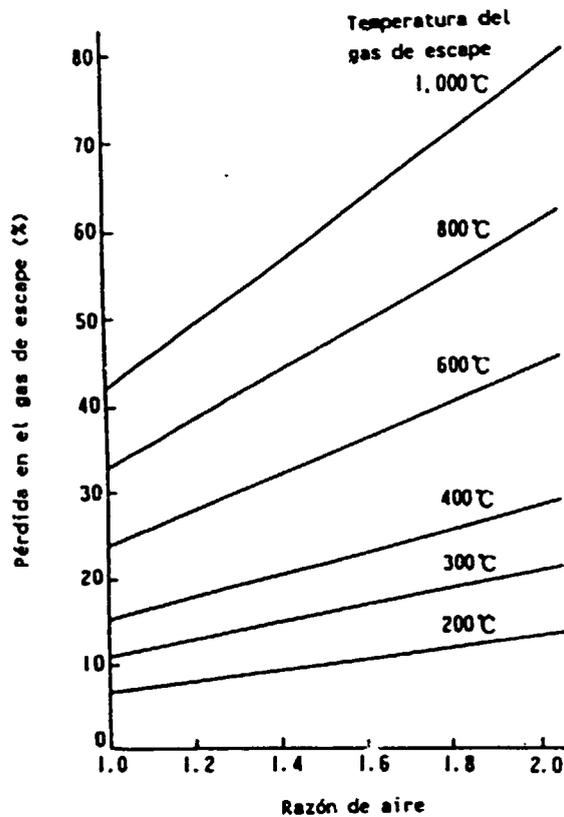


Figura 12 Relación entre la razón de aire y la pérdida en el gas de escape

El Cuadro 10 muestra el efecto que tiene sobre el ahorro de combustible mejorar la razón de aire. Los porcentajes de combustible ahorrado que figuran en este cuadro se han calculado con la fórmula siguiente:

$$S = \frac{L (\mu_1 - \mu_2) \times T \times C_p}{F - Q - L (\mu_2 - 1) \times T \times C_p} \times 100 (\%)$$

- donde
- S: combustible ahorrado
 - L: cantidad teórica de aire para la combustión $m^3 N/kg$ de combustible
 - μ_1 : razón de aire antes de la corrección
 - μ_2 : razón de aire después de la corrección
 - T: temperatura del horno
 - C_p : calor específico del aire a baja presión $kcal/m^3 N \cdot ^\circ C$
 - F: valor calorífico mínimo del combustible $kcal/kg$ de combustible
 - Q: pérdida debida al gas de escape en la combustión teórica $kcal/kg$ de combustible

Si el horno de recalentamiento no está equipado con un mecanismo de control automático de la razón aire/combustible, es necesario tomar muestras periódicas del gas del horno y medir su contenido en O_2 mediante un analizador de gases. En la Figura 13 se ilustra un ejemplo típico de horno de recalentamiento dotado de un mecanismo de control automático de la razón aire/combustible.

**Cuadro 10 Porcentaje de combustible que se ahorra al corregir la razón de aire
(en el caso del aceite pesado)**

Temperatura del horno (°C)	Razón de aire antes de la corrección	Razón de aire después de la corrección				
		1,40	1,36	1,20	1,10	1,00
700	1,70	11,6	14,9	17,9	20,8	23,4
	1,60	7,72	11,1	14,3	17,3	20,1
	1,50	3,86	7,43	10,7	13,8	16,7
	1,40	-	3,76	7,27	10,5	13,5
	1,30	-	-	3,65	7,01	10,1
	1,20	-	-	-	3,48	6,74
	1,10	-	-	-	-	3,38
900	1,70	18,7	23,5	27,7	31,5	34,9
	1,60	12,5	17,6	22,2	26,3	29,9
	1,50	6,23	11,7	16,6	21,0	25,0
	1,40	-	5,94	11,3	16,0	20,2
	1,30	-	-	5,66	10,7	15,2
	1,20	-	-	-	5,29	10,1
	1,10	-	-	-	-	5,06
1.100	1,70	30,8	37,3	42,6	47,1	51,0
	1,60	20,6	28,0	34,1	39,3	43,7
	1,50	10,3	18,6	25,6	31,4	36,4
	1,40	-	9,43	17,3	23,8	29,4
	1,30	-	-	8,67	15,9	22,1
	1,20	-	-	-	7,91	14,7
	1,10	-	-	-	-	7,36
1.300	1,70	55,0	61,9	67,1	70,9	74,0
	1,60	36,7	46,5	53,6	59,1	63,4
	1,50	18,3	31,0	40,2	47,3	52,9
	1,40	-	15,7	27,2	35,9	42,7
	1,30	-	-	13,7	23,9	32,1
	1,20	-	-	-	11,9	21,3
	1,10	-	-	-	-	10,7

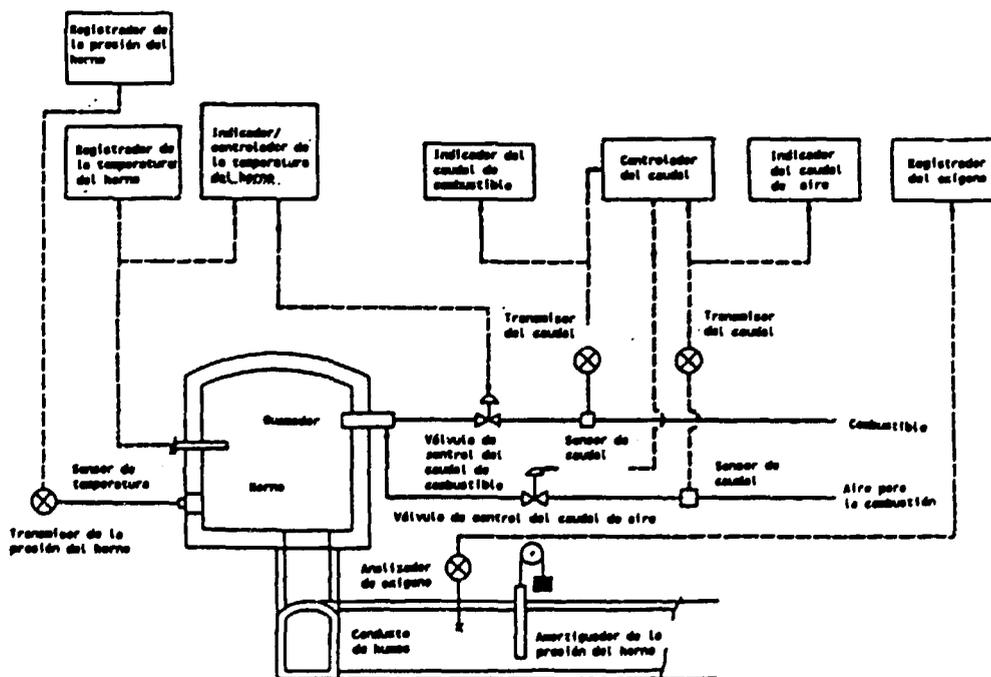


Figura 13 Sistema de control de la razón aire/combustible con un regulador de caudal

ii) Control de la presión del horno

También es importante controlar la presión del horno. El valor preestablecido de la presión del horno suele situarse en 0,2-0,4 mm H₂O al nivel de la línea del crisol donde se carga el acero calentado. Las puertas del horno de recalentamiento han de estar abiertas mientras se carga o extrae el acero. Si la presión en el horno fuera negativa, provocaría la entrada de aire exterior, lo que incrementaría la pérdida de calor y haría que la distribución de la temperatura en el horno no fuera uniforme. Causaría asimismo otros problemas, como la oxidación del acero. Como la presión del horno se modifica con el lugar de medición, la regulación de la presión del horno debe hacerse con sumo cuidado. En un horno de recalentamiento que tiene una temperatura elevada, la presión aumenta 1 mm H₂O por cada metro de incremento de la altura debido al empuje del gas muy caliente en el horno. De ahí que la presión del horno se establezca en el valor que se obtiene de la fórmula siguiente respecto del lugar de medida que se indica en la Figura 14.

$$P = (0,2 - 0,4) + L \text{ (mm H}_2\text{O)}$$

donde P: valor preestablecido para la presión del horno (mm H₂O)

L: altura desde el crisol hasta el orificio de medición (m)

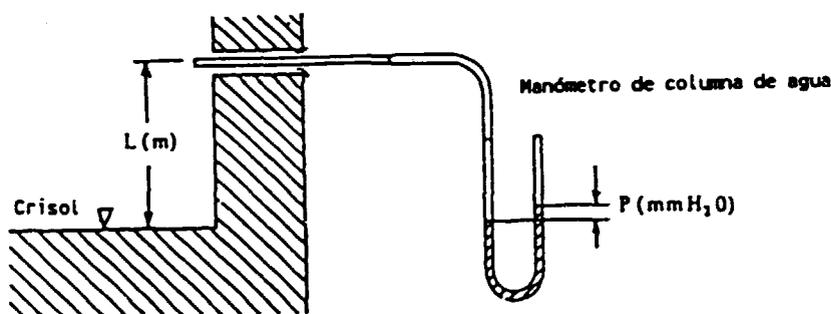


Figura 14 Medición y regulación de la presión del horno

Además de controlar correctamente la presión del horno, es importante hacer las aberturas lo más pequeñas que sea posible y cerrarlas herméticamente para impedir que se escape gas a alta temperatura y que entre aire exterior, por ejemplo por la puerta de carga, la puerta de extracción y las ventanillas de inspección abiertas en las paredes o el techo del horno.

3.2.6 Racionalización de los procesos de calentamiento y refrigeración

i) Carga caliente

Cuando el equipo de colada continua y el horno de recalentamiento del laminador se encuentran próximos y la disposición se presta a utilizar una carga caliente, debe adoptarse este método, pues se reduce la tasa de consumo de combustible. El método consiste en cargar directamente en el horno de recalentamiento el acero a alta temperatura a fin de conservar la energía. En general, sin embargo, es difícil procesar toda la cantidad debido a la diferencia de capacidad que hay entre el equipo de colada continua y el tren de laminación. En el Japón, la tasa de utilización de la carga caliente en el proceso de laminación es por término medio de alrededor del 50%, llegándose al 80% en los casos de mayor eficiencia; la temperatura de carga es de unos 500 °C en promedio y de unos 800 °C como máximo. La

tasa de conservación de energía por el método de carga caliente es de 20×10^3 kcal/t por cada 100°C de temperatura de carga. Así pues, es posible ahorrar gran cantidad de energía elevando el porcentaje de carga caliente y la temperatura de ésta.

3.2.7 Prevención de la pérdida de calor por radiación y transmisión

La pérdida de calor en un horno de recalentamiento se divide a grandes rasgos en: 1) pérdida por radiación por las aberturas y la superficie del crisol del horno; 2) pérdida por refrigeración en los largueros tubulares refrigerados por agua, y 3) pérdida por acumulación de calor en el aislamiento interno y en los elementos que componen el crisol del horno. En este último caso la pérdida puede ignorarse cuando el horno se mantiene en funcionamiento durante un cierto período de tiempo sin grandes cambios de temperatura, como sucede en el horno de recalentamiento de acero continuo.

i) Prevención de la pérdida de calor por radiación desde la superficie del horno

a) Cantidad de calor que emana de la superficie del horno

La cantidad de calor que emana de la superficie del crisol del horno es la suma de la convección natural y la radiación térmica. Esta cantidad puede calcularse a partir de las temperaturas existentes en la superficie del horno. Tales temperaturas deben medirse en el mayor número de puntos que sea posible, para utilizar después el promedio de los valores obtenidos. Cuando el número de puntos de medición es demasiado pequeño, el margen de error es considerable.

La cantidad (Q) de calor que emana de un horno de recalentamiento instalado en el edificio de una fábrica se calcula con la fórmula siguiente:

$$Q = a \times (t_1 - t_2)^{\frac{5}{4}} + 4,88 \epsilon \left[\left(\frac{t_1 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_2 + 273}{100} \right)^4 \right]$$

donde

a: factor relativo a la dirección de la superficie de convección natural
techo = 2,8, paredes laterales = 2,2, solera = 1,5

t_1 : temperatura de la superficie de la pared exterior del horno ($^\circ\text{C}$)

t_2 : temperatura del aire alrededor del horno ($^\circ\text{C}$)

ϵ : emisividad de la superficie de la pared exterior del horno

El primer término de esta fórmula representa la cantidad de calor que emana por convección natural, y el segundo término representa la cantidad de calor que emana por radiación. La Figura 15 muestra la relación, calculada con esta fórmula, entre la temperatura de la superficie de la pared exterior y la cantidad de calor emanada.

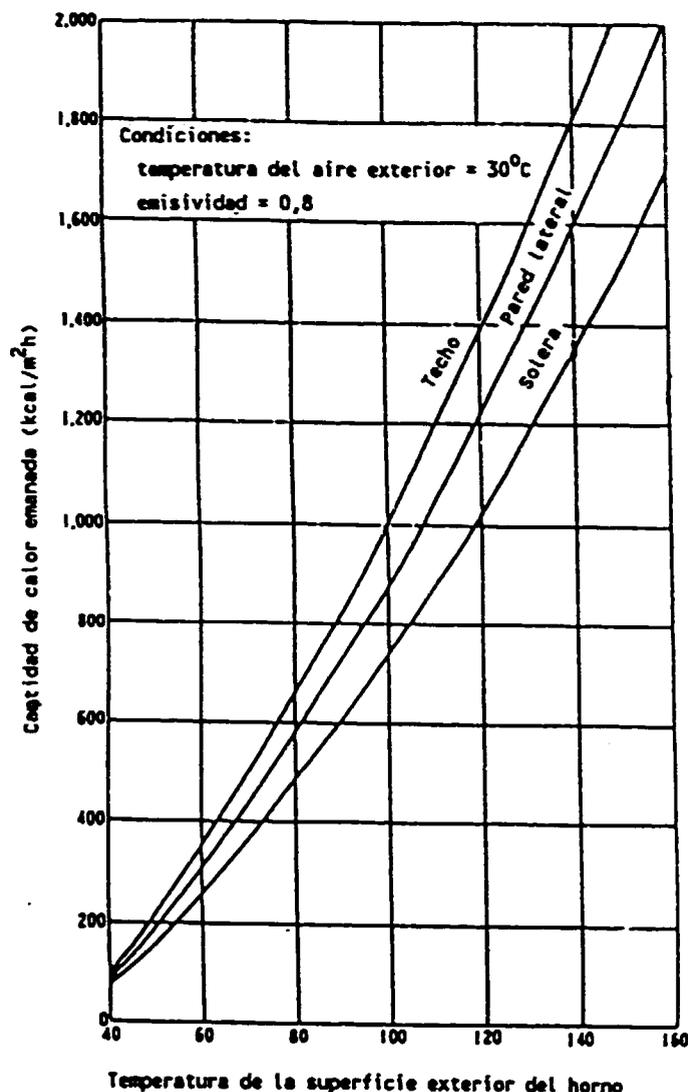


Figura 15 Relación entre la temperatura de la superficie exterior y la cantidad de calor emanada

Esto se explica con el ejemplo siguiente.

Tenemos un horno de recalentamiento cuyo techo, paredes laterales y solera tienen 20 m², 50 m² y 20 m² de superficie respectivamente. Se miden las temperaturas de superficie, que son en promedio de 80 °C, 90 °C y 100 °C respectivamente. Evaluemos la cantidad de calor que emana de la superficie total de este horno. En la Figura 15, las cantidades de calor emanadas del techo, las paredes laterales y la solera por unidad de superficie son de 650 kcal/m²h, 720 kcal/m²h y 730 kcal/m²h respectivamente. Por consiguiente, la cantidad total de calor emanado es

$$Q = (650 \times 20) + (720 \times 50) + (730 \times 20) = 63.600 \text{ kcal/h}$$

b) Reforzamiento del aislamiento

La pérdida de calor por radiación desde la superficie del crisol de un horno puede reducirse reforzando su método de aislamiento. Hay dos maneras de hacer esto: una consiste en revestir con fibrocéramica la superficie interior de la pared, y otra es revestir la superficie exterior de la pared con fibrocéramica o lana mineral. A continuación figuran ejemplos de mejora conseguida reforzando el aislamiento.

La Figura 16 muestra una composición habitual de las paredes de un horno de recalentamiento. En este caso, las paredes del horno están hechas exclusivamente con ladrillos refractarios, y el espesor de la pared es de 460 mm.

La Figura 17 muestra un ejemplo en el que el aislamiento se ha reforzado revistiendo la superficie interior de la pared del horno de la Figura 16 con una capa de fibrocerámica de 50 mm de espesor.

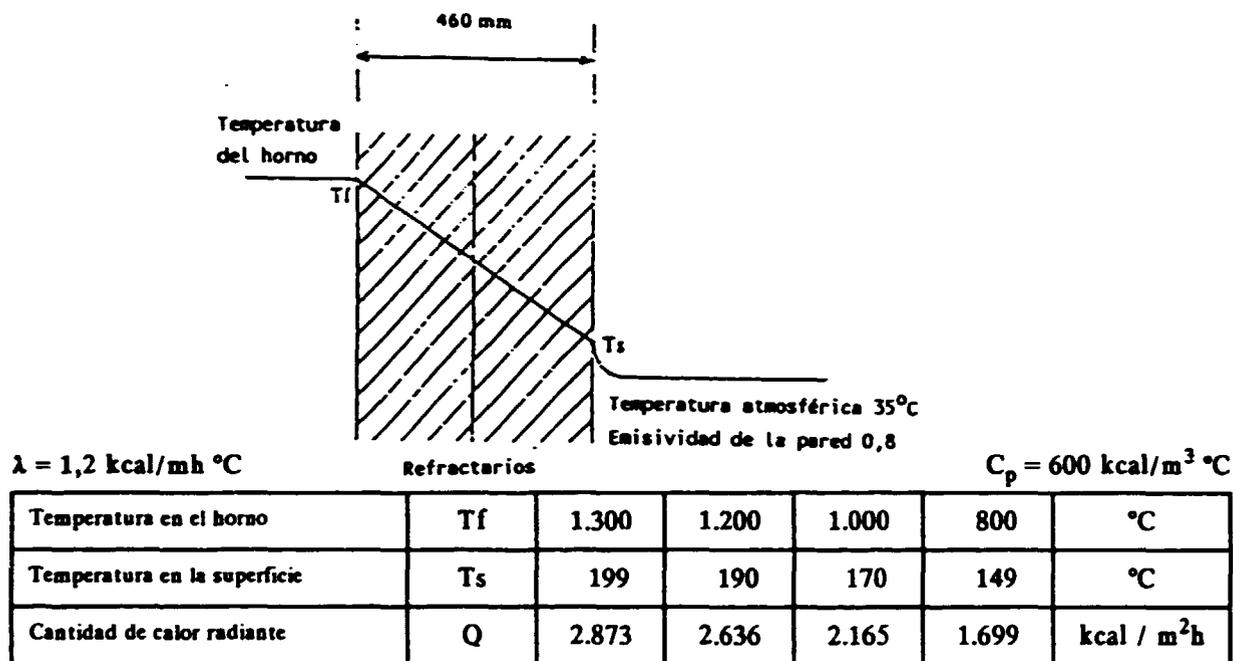


Figura 16 Temperatura normal de la pared de un horno de recalentamiento

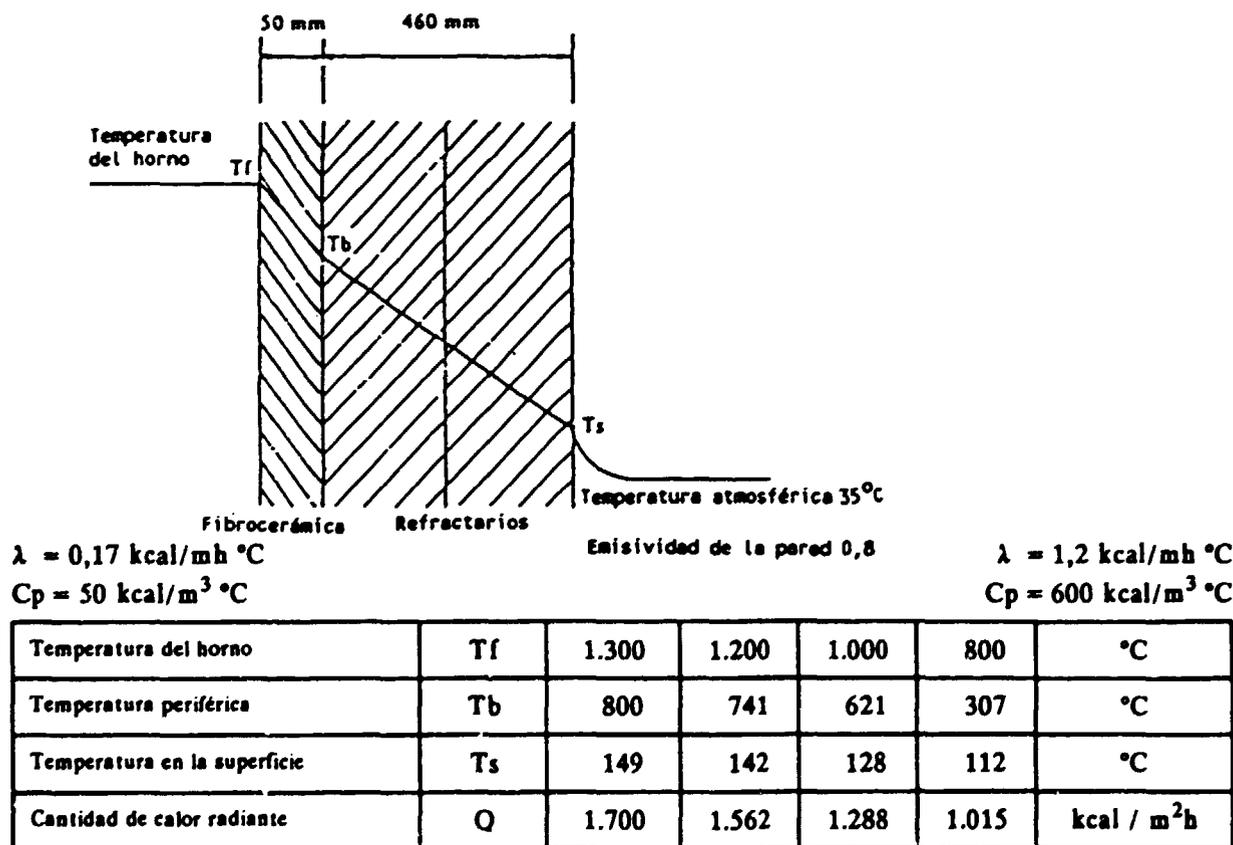


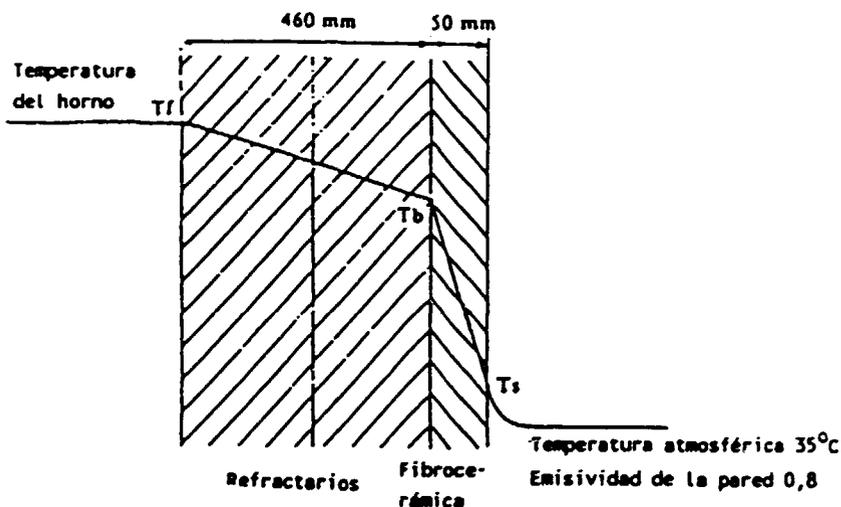
Figura 17 Plan de mejora de la composición de la pared de un horno de recalentamiento

Con esta mejora se consigue, como indica el Cuadro 11, un ahorro de energía del 41% debido a que desciende la cantidad de calor radiante y se reduce la temperatura de la superficie exterior de la pared. Al estar revestidos de fibrocerámica, que tiene una gran resistencia al fuego y una excelente capacidad de aislamiento, los ladrillos refractarios no alcanzan tanta temperatura y tienden con ello a ser más duraderos. No obstante, este método sólo puede emplearse cuando es posible reducir el volumen del horno.

Cuadro 11 Efectos de mejorar la composición de la pared en el horno de recalentamiento

	Cuando la temperatura del horno es de 1300 °C		Efectos de la mejora
	Antes de la mejora	Después de la mejora	
Temperatura en la superficie	199 °C	149 °C	Reducción del 25% de la temperatura de la superficie
Cantidad de calor radiante	2.873 kcal/m ² h	1.700 kcal/m ² h	Reducción del 41% de la cantidad de calor radiante

A continuación, en la Figura 18, vemos un caso en el que la superficie exterior de la pared del horno se ha recubierto con una capa de fibrocerámica de 50 mm de espesor.



$\lambda = 1,2 \text{ kcal/mh } ^\circ\text{C}$
 $C_p = 600 \text{ kcal/m}^3 \text{ } ^\circ\text{C}$

$\lambda = 0,17 \text{ kcal/mh } ^\circ\text{C}$
 $C_p = 50 \text{ kcal/m}^3 \text{ } ^\circ\text{C}$

Temperatura del horno	T_f	1.300	1.200	1.000	800	°C
Temperatura periférica	T_b	649	601	506	411	°C
Temperatura en la superficie	T_s	149	142	128	112	°C
Cantidad de calor radiante	Q	1.700	1.562	1.288	1.015	kcal/m ² h

Figura 18 Plan de reconstrucción de la composición de la pared de un horno de recalentamiento

Cuadro 12 Temperatura normal de la pared de un horno de recalentamiento en el Japón

Temperatura de la infraestructura (°C)	Temperatura normal de la superficie exterior de la pared (°C)	
	Techo	Pared lateral
1.300	140	120
1.100	125	110
900	110	95
700	90	80

Observaciones:

1. Los valores de las temperaturas de la pared exterior que se indican en el cuadro son valores medios determinados en la superficie de la pared (excluidas las partes peculiares) con una temperatura atmosférica de 20 °C y en condiciones de funcionamiento ordinario del horno.
2. Los valores de las temperaturas de la pared exterior que se indican en el cuadro no son aplicables en general a los hornos industriales siguientes:
 - 1) Los que tienen una capacidad teórica no superior a 200.000 kcal/h.
 - 2) Aquellos cuyas paredes son de refrigeración forzada.
 - 3) Los de solera giratoria.

Si la superficie exterior de la pared está recubierta de placas de acero, aumentará su temperatura al revestir esas placas con fibrocerámica. Y la distorsión por dilatación térmica podría dañar la cuba del horno.

A modo de referencia, en el Cuadro 12 se indican las temperaturas habituales en las paredes exteriores de un horno de recalentamiento en el Japón.

ii) Prevención de las pérdidas de calor por las aberturas

Se entiende por este tipo de pérdidas las del calor que se pierde por radiación directa por las aberturas y las debidas al gas de combustión que se escapa por ellas.

a) Pérdida de calor por radiación por las aberturas

Cuando el crisol del horno tiene una abertura, el calor del interior escapa al exterior como calor radiante. La cantidad del calor así perdida dependerá del grosor de la pared del horno y de la forma de la abertura. En la Figura 19 se muestran las cantidades de calor perdidas por radiación directa por aberturas de diversas formas. Cada cantidad está representada con respecto al factor de cantidad de calor radiante que emite un cuerpo negro perfecto equivalente a la superficie de la abertura.

La pérdida de calor por una abertura se calcula con la fórmula siguiente:

$$Q = 4,88 \times \left(\frac{T}{100} \right)^4 \times a \times A \times H$$

- donde: T: temperatura absoluta (K)
 a: factor de radiación total
 A: superficie de la abertura
 H: tiempo (horas)

Esto se explica en el ejemplo que figura a continuación.

Un horno de recalentamiento con paredes de 460 mm de espesor (X) tiene para la extracción de las palanquillas una abertura de 1 m de alto (D) y 1 m de ancho. Cuando la temperatura del horno es de 1.340 °C, la cantidad (Q) de calor radiante que se pierde por esa abertura se estima de la manera siguiente.

La abertura es cuadrada, y $D/X = 1/0,46 = 2,17$. Así, el factor de radiación total es 0,7 según la Figura 19, y tenemos

$$Q = 4,88 \times \left(\frac{1.340 + 273}{100} \right)^4 \times 0,71 \times 1 = 234.500 \text{ kcal/h}$$

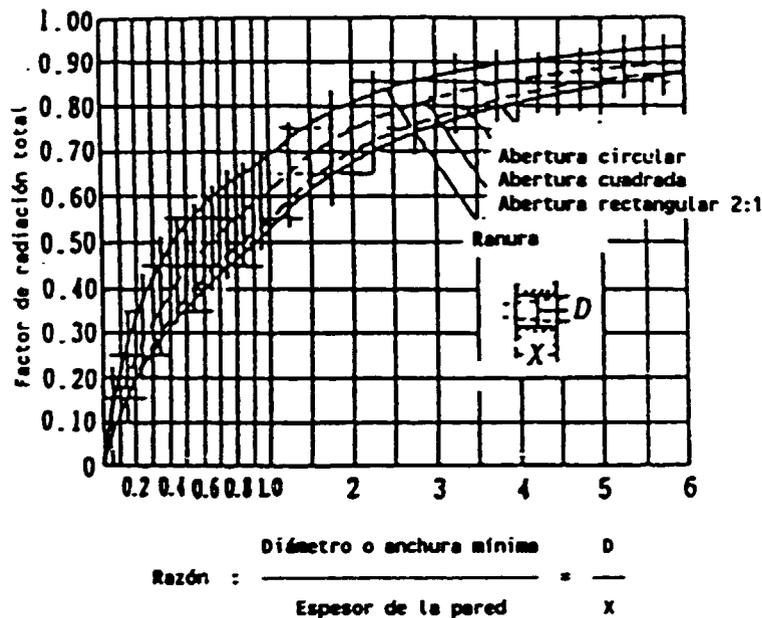


Figura 19 Factor para determinar el equivalente de calor que se escapa por las aberturas en relación con la cantidad de calor radiante que emite un cuerpo negro perfecto

b) Pérdida de calor debida al gas de combustión que escapa por las aberturas

Como la presión que hay en el interior de un horno de recalentamiento en funcionamiento es algo mayor que la del aire exterior, es inevitable que el gas de combustión del interior se escape por las aberturas y produzca con ello una pérdida de calor.

Sería más perjudicial que el aire exterior entrara en el horno, pues la temperatura se distribuiría de manera desigual y se oxidarían las palanquillas. Como se ha señalado en 3.2.5 ii), esta pérdida de calor equivale a alrededor de un 1% de la cantidad total de calor generada en el horno, siempre que la presión del horno esté controlada correctamente.

c) Prevención de la pérdida por el agua de refrigeración

La pérdida de calor en los largueros tubulares refrigerados con agua en un horno de recalentamiento continuo asciende a hasta un 10-15% del consumo de combustible. En concreto, un horno de largueros móviles tiene estructuralmente una superficie refrigerada por agua que es 1,5 veces mayor que la de un

horno de empuje. En consecuencia, el problema de la pérdida de calor por el agua de refrigeración es en el primer caso más importante.

Para resolver este problema se ha aplicado con frecuencia, tanto a hornos nuevos como a hornos ya existentes, el método de doble aislamiento de los largueros tubulares. En este método se utiliza fibrocéramica muy aislante que luego se recubre con moldeable.

La Figura 20 muestra un ejemplo de doble aislamiento, y en la Figura 21 se comparan los valores de pérdida por refrigeración (valores calculados) en los casos de aislamiento sencillo y aislamiento doble.

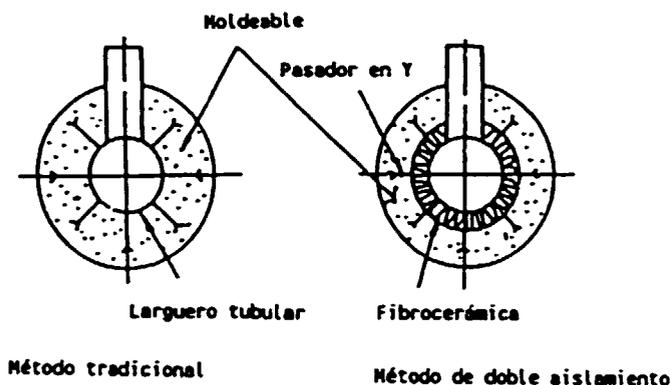


Figura 20 Método de doble aislamiento para el larguero

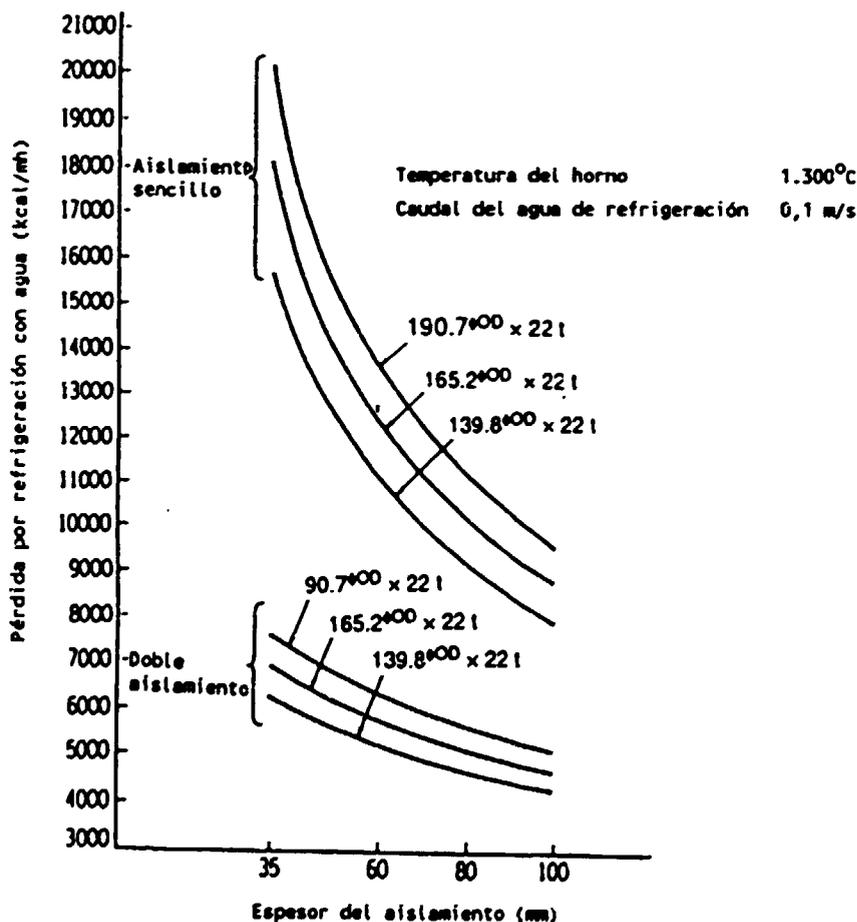


Figura 21 Comparación de las pérdidas por refrigeración con agua (valores calculados)

En la Figura 21 se observa que, si con un tubo cuyo diámetro exterior es de 165,2 mm la pérdida por refrigeración con un aislamiento sencillo de 60 mm de espesor es del 100%, con un aislamiento doble de 15 mm de fibrocéramica más 45 mm de moldeable la pérdida se reduce al 47%. Se trata por tanto de una reducción considerable del consumo de combustible en comparación con los hornos cuyas conducciones tienen aislamiento sencillo. Al mismo tiempo, el empleo del doble aislamiento permite reducir considerablemente la cantidad de agua de refrigeración. Este método tiene asimismo la ventaja de que las marcas de los rodillos son pequeñas, ya que la temperatura de la superficie de la capa aislante es más baja que en el caso del aislamiento sencillo.

3.2.8 Recuperación del calor perdido

La cantidad de calor que extrae de un horno de recalentamiento el gas de escape a alta temperatura es muy grande. Reducir esa cantidad de calor extraída tiene una importante repercusión sobre el ahorro de energía. Hay dos maneras de hacerlo. Una consiste en reducir el volumen de gas de escape, y otra en bajar la temperatura de dicho gas. La primera es la racionalización de la razón de aire, que se ha descrito en 3.2.5 i). La segunda se consigue recuperando el calor perdido del gas de escape.

Hay cuatro métodos para recuperar el calor del gas de escape:

- 1) precalentar el aire para la combustión mediante un recuperador;
- 2) generar vapor o agua caliente mediante una caldera de recuperación;
- 3) precalentar los materiales con el gas de escape, y
- 4) utilizar las cascadas como fuente de calor para otras instalaciones.

A modo de referencia, en el Cuadro 13 figuran las tasas habituales de recuperación del calor perdido en los hornos industriales del Japón.

Se describe a continuación el precalentamiento del aire para la combustión, operación que se realiza habitualmente en los hornos de recalentamiento.

i) Precalentamiento del aire para la combustión mediante un recuperador

Un recuperador es un aparato que permite recuperar el calor del gas de escape procedente de un horno de recalentamiento. La superficie de transferencia del calor puede ser de metal o de material cerámico.

Cuando la temperatura del gas de escape es inferior a 1.000 °C y el aire para la combustión está precalentado suele utilizarse por lo general un recuperador metálico.

El empleo de aire para la combustión precalentado permite ahorrar combustible. La tasa de ahorro de combustible viene dada por la fórmula siguiente:

$$S = \frac{P}{F + P - Q} \times 100 (\%)$$

donde: S: tasa de ahorro de combustible

F: valor calorífico mínimo del combustible (kcal/kg de combustible)

P: cantidad de calor aportada por el aire precalentado (kcal/kg de combustible)

Q: cantidad de calor extraída por el gas de escape (kcal/kg de combustible)

Cuadro 13 Tasas normales de recuperación del calor perdido en los hornos industriales del Japón

Temperatura del gas de escape (°C)	Clasificación según capacidad	Tasa media de recuperación del calor perdido (%)	Referencia	
			Temperatura del gas de escape (°C)	Temperatura del aire precalentado (°C)
500	A - B	20	200	130
600	A - B	20	290	155
700	A	30	300	260
	B	25	330	220
	C	20	370	180
800	A	30	370	300
	B	25	410	250
	C	20	450	205
900	A	35	400	385
	B	25	490	285
	C	20	530	230
1.000	A	40	420	490
	B	30	520	375
	C	25	570	315
Más de 1.000	A	40	-	-
	B	30	-	-
	C	25	-	-

Notas:

1. Por "temperatura del gas de escape" se entiende la temperatura del gas de escape a la salida del horno.
2. La clasificación de los hornos industriales según su capacidad es la siguiente:
 - A. Horno industrial cuya capacidad teórica es superior a 20 MM kcal/h.
 - B. Horno industrial cuya capacidad teórica es superior a 5 MM kcal/h pero inferior a 20 MM kcal/h.
 - C. Horno industrial cuya capacidad teórica es superior a 1 MM kcal/h pero inferior a 5 MM kcal/h.

Observaciones:

1. Los valores de la tasa media de recuperación del calor perdido que figuran en el presente cuadro se han determinado en función de la razón entre la cantidad de calor recuperada y la cantidad de calor sensible en un gas de escape procedente del horno cuando la combustión se realiza bajo una carga próxima a la capacidad teórica.
2. Los valores de la tasa media de recuperación del calor perdido que figuran en el presente cuadro servirán como norma para los hornos continuos construidos a partir del 1 de enero de 1980.
3. Los valores de la tasa media de recuperación del calor perdido que figuran en el presente cuadro no servirán como norma para la tasa de recuperación de los hornos industriales siguientes:
 - 1) Los que tienen una capacidad teórica que no supera 1 MM kcal/h.
 - 2) Los que tienen un tiempo de funcionamiento que no supera las 1.000 horas anuales.
4. Los valores de la temperatura del gas de escape y de la temperatura del aire precalentado que figuran como referencia se han obtenido calculando la temperatura del gas de escape cuando se ha recuperado el calor perdido hasta la tasa media, y la temperatura del aire precalentado cuando el aire ha sido precalentado por el calor recuperado antedicho, en las condiciones siguientes:
 - 1) Caída de la temperatura debida a la pérdida de calor liberado, etc., entre la salida del horno y el intercambiador de calor para precalentar el aire: 200 °C.
 - 2) Combustible: combustible líquido.
 - 3) Temperatura atmosférica: 20 °C
 - 4) Razón de aire: 1,2

Según esta fórmula se han calculado las tasas de ahorro de combustible (aceite pesado y gas natural) para diversas temperaturas del gas de escape y del aire precalentado. Los resultados se indican en las Figuras 22 y 23.

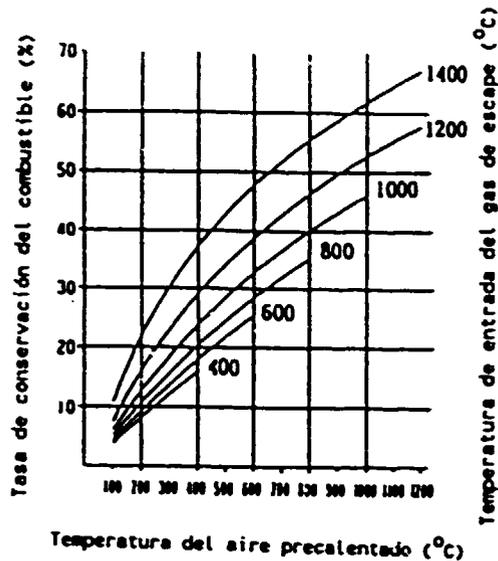


Figura 22 Tasa de conservación del combustible cuando se utiliza aceite

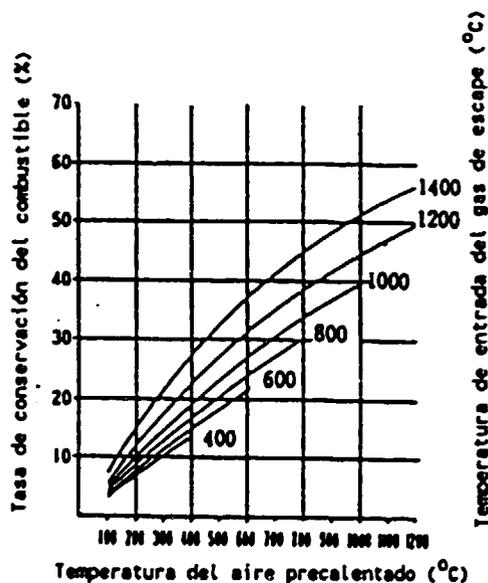


Figura 23 Tasa de conservación del combustible cuando se utiliza gas natural

A la hora de instalar un recuperador en un horno de recalentamiento continuo, es importante elegir una temperatura del aire precalentado con la que se consiga un equilibrio entre el efecto de ahorro de combustible y el costo de la inversión en el equipo.

Además hay que verificar los puntos siguientes:

- 1) Tiro del gas de escape: cuando el gas de escape pasa por un recuperador, su resistencia al tiro suele provocar una pérdida de presión de 5-10 mm H₂O. Por tanto, debe verificarse este aspecto.
- 2) Compresor para la combustión del aire: cuando pasa por un recuperador, el aire para la combustión suele perder 100-200 mm H₂O de presión. Por tanto, es preciso verificar la presión de descarga del compresor y aportar la presión necesaria mediante quemadores.

Conclusiones

Si dividimos las medidas de conservación de la energía en el sector industrial de una manera general, obtendremos los tres enfoques que se indican a continuación.

La fase 1 consiste esencialmente en planificar la mejora completa, por etapas, de las condiciones de funcionamiento reforzando la gestión de la energía sobre la base de las instalaciones existentes.

La fase 2 tiene por objeto introducir en las instalaciones mejoras únicamente parciales. En esta fase se hace hincapié en reducir el consumo de energía y se persigue un uso más eficiente de las emisiones de gases de escape.

La fase 3 se centra en el desarrollo de un nuevo proceso de conservación de energía y en la elaboración de planes para una reestructuración fundamental del proceso de fabricación.

En el presente manual se ha tratado sobre todo de presentar la fase 1. Estas medidas son relativamente sencillas, y hay muchos casos en los que no son muy eficaces desde el punto de vista del ahorro de energía. No obstante, la eficacia global de todos esos casos acumulados fue mayor de lo que se esperaba. Esperamos desde luego que, sobre la base del presente manual, se reevalúen las instalaciones desde una nueva perspectiva y se puedan adoptar y aplicar medidas concretas.

Además, incluso en el caso de las medidas que ya se han aplicado, esperamos que se compruebe cuidadosamente si han producido o no los resultados previstos en función de los objetivos de ahorro de energía que se habían fijado y que, en caso necesario, se introduzcan mejoras que aumenten la eficiencia.

Referencias

1. Handbook of Iron and Steel.
2. Handbook of Energy Conservation for Industrial Furnaces, Japan Industrial Furnace Association.
3. Data Sheet for Energy Management (1), Energy Conservation Center.
4. Iron and Steel, vol. 64, núm. 13 (1978).
5. Refractory Material, núm. 178, vol. 24 (1972).